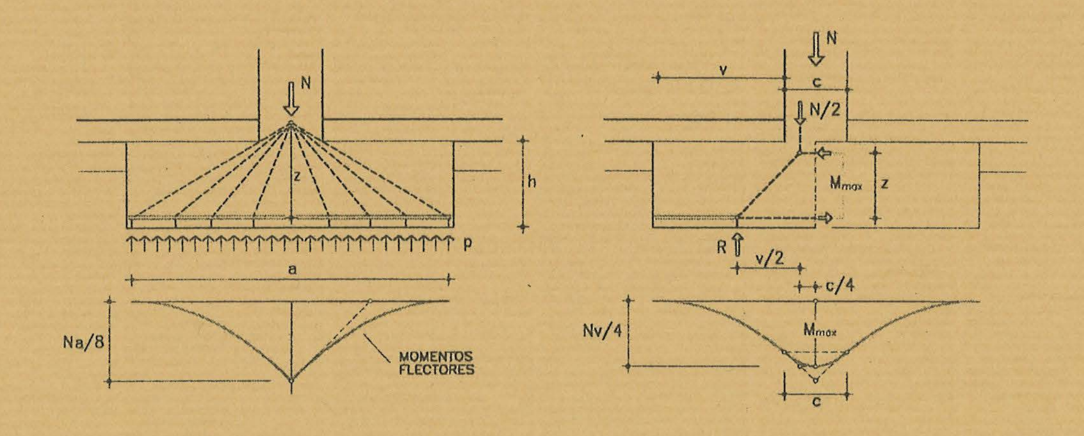
ZAPATAS (I)

CIMIENTOS

por

José Luis de Miguel Rodríguez



CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

ZAPATAS (I)

CIMIENTOS

por

José Luis de Miguel Rodríguez

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

Zapatas I.
Cimientos.

Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Composición y maquetación: Daniel Álvarez Morcillo.
CUADERNO 109.01
ISBN: 84-95365-95-2 (Zapatas. Obra completa)
ISBN: 84-95365-96-0 (Zapatas I. Cimientos)
Depósito Legal: M-22012-2001

CIMIENTOS

1. TIPOS DE CIMIENTO

De una manera u otra, todas las construcciones sobre la superficie terrestre acaban dependiendo, para su equilibrio y supervivencia, del terreno; se sustentan y apoyan contra él. Los elementos que se usan en la transición entre edificio y terreno se conocen como *cimientos*.

En los casos más sencillos, de estructuras de paredes de carga o soportes, éstos deben rematarse en *zanjas* o *zapatas* con objeto de proveer una tensión en su base compatible con la del terreno. Si éste presenta una baja capacidad portante, el ensanchamiento puede llegar a ocupar la totalidad de la planta del edificio, diciéndose entonces que se cimenta en *losa*. Si el firme se encuentra a una profundidad moderada, el sistema anterior debe complementarse con *pozos*. Si no hay manera de encontrar una capa fiable o con capacidad portante suficiente a poca profundidad bajo el nivel de explanación, una solución posible es alcanzar localmente una más profunda o una superficie de sustentación mucho más amplia a base de *pilotes*.

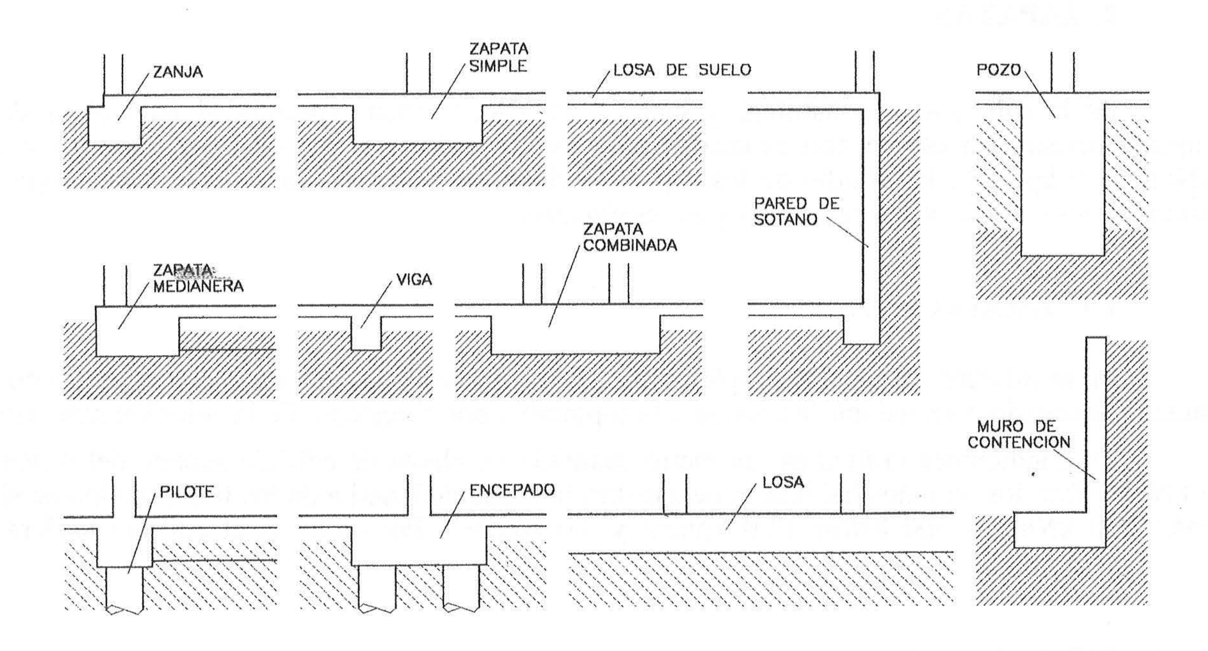


Figura 1. Elementos de cimentación

El conjunto de pilotes para cimentar el de soportes de un edificio necesita en general de elementos accesorios, tales como *encepados* para resolver el desvío de un soporte a varios pilotes, o *vigas* para corregir los efectos del error de posición que habitualmente tienen los pilotes. Ese último artificio también debe usarse cuando, por alguna condición, una zapata o zanja resulte muy descentrada respecto al soporte, como en el caso de las de medianería.

En obras de arquitectura resulta habitual disponer en la base del edificio, como elemento de agarre para el solado, una capa de hormigón, —conocida generalmente como *solera*, ya que la forma de construirla es similar a la que se usa en las de aceras y pavimentos exteriores—. Aunque no es propiamente un cimiento, ya que no transmite otras cargas al suelo que las propias, desempeña en la estructura un papel crucial en el enlace y atado del conjunto de los elementos de cimiento, sean zapatas o pilotes. Cuando no hay losa de suelo y se desea reproducir, siquiera imperfectamente, su efecto, se suele acudir a *zanjas de arriostramiento*.

En edificios urbanos es muy frecuente la existencia de espacios bajo rasante, que necesitan en su derredor de *paredes de sótano*. En principio tampoco son propiamente cimientos, y más que servir para descargar el edificio en el terreno, sufren sus embates. Como en su tratamiento comparten con los demás tipos de cimientos parte de la formulación que hace referencia al terreno, se suelen incluir en esta categoría. Es habitual además que sustenten pilares, sirviendo para repartir sus cargas, y cimentarlas en zanja. Por un motivo similar, se acostumbra a incluir, en el estudio de cimientos, los *muros de contención* de urbanización destinados a salvar un desnivel, sometidos a —sólo— empuje del terreno.

En muchos casos la supervivencia de la obra en fases iniciales depende de elementos de contención, como *pantallas* o *empalizadas*, complementadas con *vigas de coronación*, *arriostramientos* o *atirantados*, que, lo mismo que en el caso anterior, no son cimientos, pero se estudian simultáneamente con ellos.

Este documento trata del dimensionado —y en su caso, armado— de los cimientos considerados exclusivamente como elementos estructurales; se supone que las condiciones que dependen de parámetros del suelo se han tratado aparte, y son dato. Tampoco se consideran aquí, mas que de manera elemental, las condiciones que pueden provenir de la consideración de acción sísmica.

2. ZAPATAS

Es la solución más habitual y sencilla, cuando, a poca profundidad bajo el nivel de cajeado, existe[1] un estrato con capacidad portante[2] significativa, por ejemplo, superior a 100 kN/m² (1,0 kp/cm²). El estudio de las zapatas incluye las *simples*, *combinadas* y en *zanja*; las *armadas* y *en masa*, y las *centradas* y *de medianería*

2.1 Zapatas simples

En la solución de zapatas simples,[3] bajo cada soporte se dispone un dado de hormigón del tamaño adecuado para reducir la tensión a la soportable por el terreno. Es la solución más usada.

En condiciones ordinarias, un metro cuadrado de planta de edificio supone del orden de 7 kN/m². Para los tamaños habituales de zapatas, la capacidad media de los terrenos tipo se sitúa entre 200 kN/m² y 300 kN/m² (2,0 kp/cm² y 3,0 kp/cm²). Por tanto, si el edificio tuviera 10

---

[1] Con frecuencia esta solución es denominada cimiento *superficial*, por contraposición a la de pilotes, que entra en la categoría de *profunda*. El adjetivo puede ser equívoco, toda vez que muchas zapatas se disponen en la superficie del cajeado del sótano inferior, que, respecto a la rasante, tienen una localización profunda.

[2] La capacidad portante depende a su vez del ancho del cimiento, de manera que más que un dato previo suele ser una conclusión. En la práctica es habitual referirse coloquialmente a la capacidad portante como una propiedad del terreno.

[3] La denominación más típica es la de *aisladas*, que se refiere al modelo de una sola zapata. En obras de arquitectura siempre están próximas unas a otras, interfiriendo mutuamente.

plantas, la carga promedio en el suelo no superaría[1] 70 kN/m², bastando entre un quinto y un tercio[2] de la superficie para cimentarlo.[3] Otros valores son:

Presión soportable del terreno		150	200	250	300	400	kN/m²
Número de plantas del edificio	2	9%	7%	6%	5%	4%	
	4	20%	14%	11%	9%	7%	
	6	26%	20%	16%	13%	10%	
	10	43%	33%	26%	22%	16%	

Fracción del solar ocupado por los cimientos

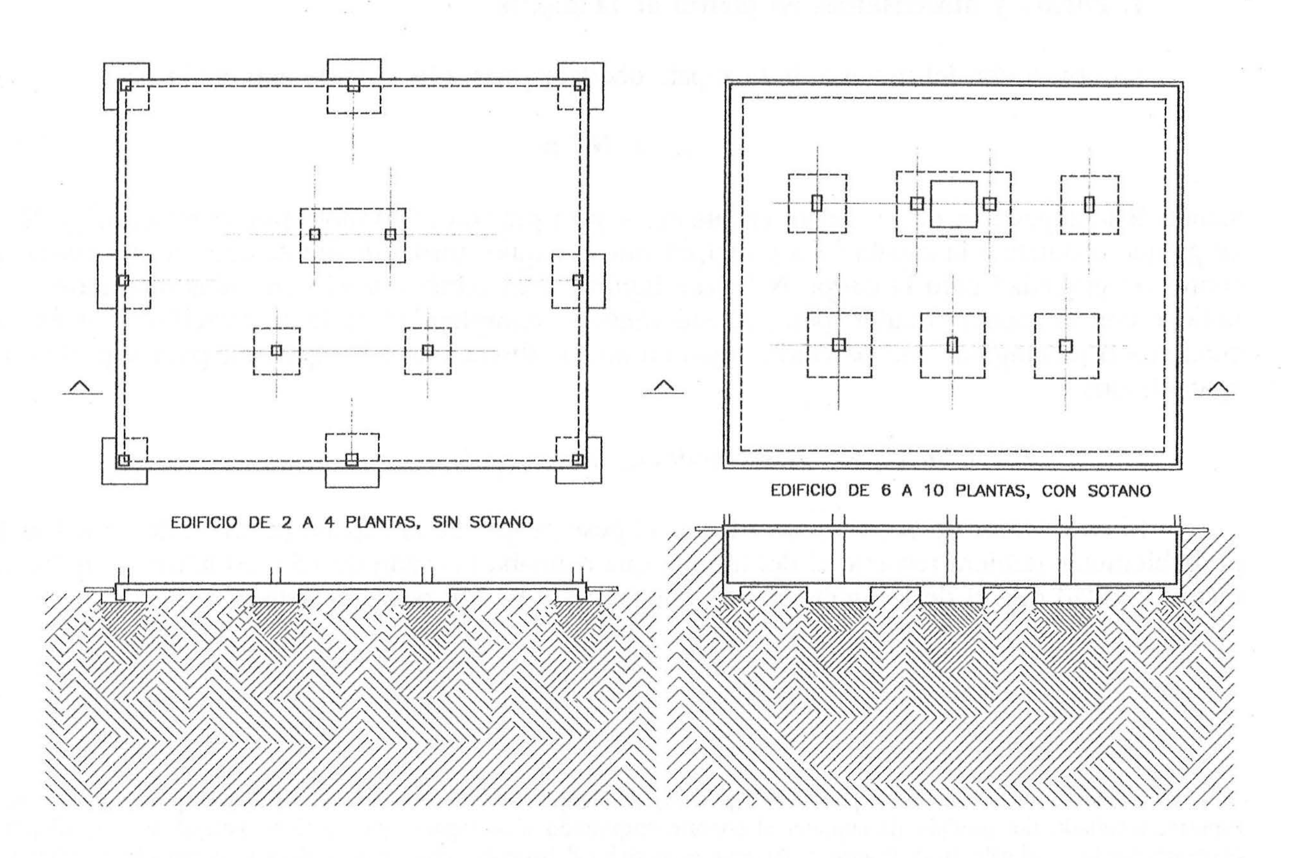


Figura 2. Soluciones de zapata simple

Si el soporte es de hormigón, es previsible que su sección corresponda a una tensión media alrededor de 0,7 kN/cm² (7.000 kN/m²), que equivale a unas 25 veces la aceptable para el terreno, de manera que cabe esperar que las zapatas deban tener lados como unas 5 veces los del soporte. Si el soporte es de acero, es obligado disponer en su base una placa para repartir la compresión del fuste a tensiones soportables por el hormigón de la zapata, por lo que la regla, referida a la placa base, puede ser similar. La zapata está pues básicamente sometida a flexión y cortante, derivada del vuelo que hay en derredor del soporte.

---

[1] Aunque cada piso se calcule para 7 kN/m², la no simultaneidad de las sobrecargas hace que la cimentación de un edificio de varias plantas proceda de considerar más bien del orden de 6,5 kN/m² en promedio.

[2] Algunos autores sugieren que, cuando la superficie de zapatas exceda del 50% de la superficie de la parcela, es cuando resulta recomendable cimentar en losa propiamente dicha.

[3] Si se dispone una zapata bajo cada soporte, dada la separación habitual entre éstos, y la manera en que se difunden las tensiones en el terreno, a poca distancia bajo el plano de las zapatas, la tensión provocada por el edificio se ha uniformado en toda la superficie del solar, véase figura 2, con consecuencias casi indistinguibles de las de una losa.

2.1.1 Zapata centrada con el soporte solicitado a compresión simple

En general, en edificios de pisos, los soportes están solicitados[1] a compresión poco excéntrica.[2] Dicha excentricidad, en la banda de 0,02 m a 0,10 m, puede ser relevante para el soporte, pero es despreciable para un elemento como la zapata, cuyo margen de precisión, en ubicación y tamaño, puede ser de ese mismo orden. En zapatas centradas, para la mayoría de los propósitos, en particular los de comprobación resistente de la zapata, se puede suponer que la reacción del terreno es una presión uniformemente repartida[3] en toda su superficie.

1. Forma y dimensiones en planta de la zapata

La obtención del tamaño de la zapata obedece pues a la sencilla expresión de:

$$\mathbf{S} = \mathbf{N} / \mathbf{p} \qquad [1]$$

siendo **S** la superficie de la zapata en planta, y **p** la presión soportable por el terreno,[4] y **N** la carga que acomete a la zapata.[5] En principio vale cualquier forma de planta con tal que posea su centro de gravedad bajo la carga, N (véase figura 3). El mínimo vuelo en todas direcciones se obtiene con la zapata circular, pero, considerando la complejidad de la excavación, la usual es cuadrada o rectangular con parecido vuelo en ambas direcciones. En general, para soportes no apantallados:

LEMA: la zapata más sencilla es la cuadrada

Si en el valor de **N** se cuenta además el peso propio de la zapata, (a razón de 25 kN/m^3), probablemente debiera restarse el del terreno que ocupaba (a razón de 15 a 20 kN/m^3), matiz de menor entidad que el de la precisión con que se mide **p**, con poca importancia práctica.[6]

---

[1] El momento en la base del soporte suele procede de compatibilidad y no de equilibrio, y es por tanto un valor espurio, resultado del modelo de suponer el soporte empotrado a la zapata, que no tiene porqué ser considerado necesariamente en el cálculo de la zapata. Aunque es tradicional hacerlo, como se verá, tiene muy poca trascendencia.

[2] En este texto, los términos *centrado* y *descentrado* se refieren a una magnitud geométrica: el soporte descentrado respecto a la zapata. Los términos *excentricidad* y *excéntrico* se refieren a una magnitud mecánica: la compresión es excéntrica respecto al eje del soporte.

[3] Dependiendo de la rigidez de la zapata con relación al terreno, y, sobre todo, de la cohesión de éste, la presión puede desde acumularse en el centro, hasta, lo que es más habitual, concentrarse en los bordes. Los valores integrales, tales como la resultante o momento resultante, que son los usados aquí, son poco sensibles a esa variación.

[4] En rigor se trata de un círculo vicioso, ya que, debido a control del *asiento*, la presión soportable depende, aunque sea poco, del tamaño de la zapata y proximidad de otras.

[5] Se entiende el valor nominal, sin seguridad, procedente del caso de carga gravitatoria. Si se considera viento, la seguridad puede ser inferior, lo que permitiría usar un valor algo más elevado de presión **p** que con el anterior. Con la compresión procedente del caso sísmico se puede contar con una presión admisible 50% mayor.

[6] El peso de la zapata, Q, en fracción de la compresión del soporte, N, para zapatas cuadradas armadas, con un canto mitad del vuelo, es:

Presión soportable del terreno		150	200	250	300	400	kN/m²
Compresión del soporte	500 kN	6%	5%	3%	3%	2%	Q/N
	1000 kN	11%	7%	5%	4%	3%	

Si se considera la reducción del peso de tierras eliminadas, el porcentaje se reduce a la tercera parte.

En el valor de N sí debe computarse la carga que pueda provenir de la planta inferior.[1] Salvo cuando se dispone forjado sanitario ésta suele descansar directamente en el terreno[2] y no añade carga en las zapatas, pero aun en ese caso resulta recomendable incluir por este concepto su sobrecarga de uso en el área tributaria del punto cimentado.

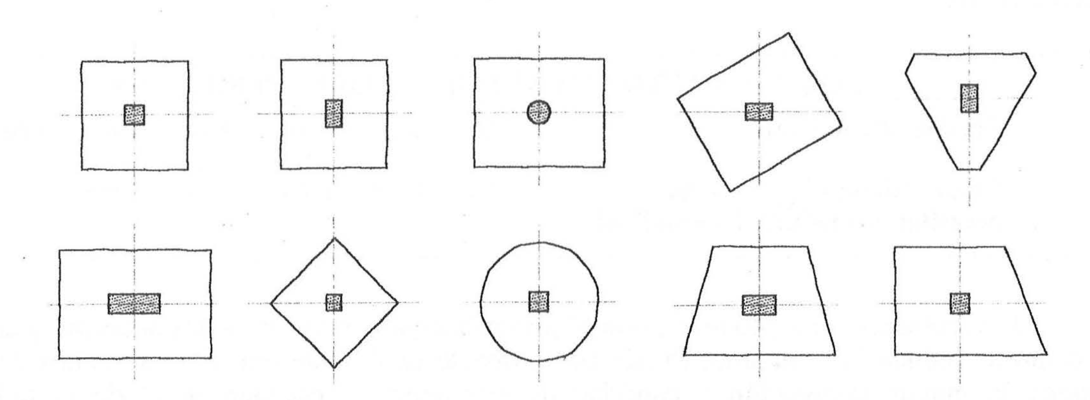


Figura 3. Forma de zapatas simples

Conviene redondear las dimensiones de la zapata a decímetros. Además, para evitar confusiones y ordenar la construcción, resulta recomendable agrupar las zapatas de la misma obra en sólo unas cuantas dimensiones discretas sensiblemente diferentes.[3] En el plano de cimientos, conviene referir las zapatas interiores a sus ejes; hacerlo a la cara de un soporte por hacer, puede resultar confuso. No es aconsejable que zapatas con cargas muy distintas tengan la misma sección; la unificación de tamaños puede redundar en asientos descontrolados.

2. Canto de la zapata

Si el terreno explanado es apto para cimentar, el canto de la zapata puede elegirse dentro de un amplio margen, siempre que se le dote de capacidad resistente en consecuencia y sea suficientemente rígida para no ser incoherente con la ley de presión del suelo adoptada. Para una zapata de planta rectangular, el momento en una sección en los haces[4] del soporte (véase figura 4) es, por unidad de ancho de la zapata, $\mathbf{M = p{\cdot}v^2/2}$. En ausencia de armadura de tracción, la capacidad resistente a momento de esa misma sección es $\mathbf{M = f_{ct}{\cdot}h^2/6}$, siendo $\mathbf{f_{ct}}$ la tensión segura de tracción del hormigón, por lo que el canto de la zapata debe ser tal que se cumpla la condición de que $\mathbf{v/h < \sqrt{(f_{ct}/3p)}}$. En el instante actual,[5] al hormigón HM20, con una resistencia a

---

[1] En la literatura al uso, escrita más bien en clave de obra civil, se suele mencionar la consideración de la tierra acopiada sobe la zapata, algo que es infrecuente, e incluso no recomendable en obras de arquitectura, en las que sobre la zapata se dispone directamente la planta inferior del edificio.

[2] Se puede descontar el peso del terreno retirado en la planta ocupada por la zapata. El terreno en derredor de la misma tiene un papel de contrapeso, y eliminarlo reduce la capacidad portante del terreno. En construcciones con sótano, es frecuente que el edificio pese menos que el terreno retirado.

[3] Como lado mínimo para que algo se denomine una zapata suele tomarse el metro, pero no es una regla universalmente aceptada. Conviene ser prudente al adoptar dimensiones menores.

[4] En la norma de hormigón actual, EHE, la sección para este cálculo se toma, por el motivo que se ve más adelante, ligeramente remetida respecto a los haces del soporte. Para la precisión de las conclusiones, el matiz importa poco, y por otro lado la regla es de difícil o imposible aplicación a soportes circulares, dispuestos al biés con la zapata, o apantallados.

[5] Los códigos de materiales, resistencias y coeficientes de seguridad que se usan en el texto se refieren a la norma española EHE, en vigor para las construcciones que se comenzaron a proyectar después de julio de 1999. Los valores corresponden a control *normal*, con un coeficiente de seguridad aplicable a las acciones de 1,54

compresión de 20 N/mm², se le reconoce una resistencia segura a tracción mínima de 0,6 N/mm² (600 kN/m²). Sustituyendo ese valor en la expresión anterior, se deduce que, si el canto es inferior al valor $\mathbf{h_m}$ dado en la **Tabla 1**, la zapata no puede ser en masa, y necesita armadura longitudinal de flexión. Para un primer tanteo, esa frontera es la de un canto del mismo orden de magnitud que el vuelo.[1]

TABLA 1. CANTO MÍNIMO DE HORMIGÓN EN MASA

Presión del terreno	150	200	250	300	400	kN/m²
Canto mínimo $\mathbf{h_m}$ para no necesitar armadura longitudinal	0,8·v	1,0·v	1,1·v	1,2·v	1,4·v	

Evidentemente cuanto menos canto posea la zapata, más armadura necesita, y aumentando el canto se reduce la armadura. Puede comprobarse fácilmente que el incremento de coste que supone la mayor excavación y cantidad de hormigón no compensan el de la reducción de armadura que se consigue con ello, de manera que la conclusión es sistemática:

LEMA: si hay que excavar en terreno apto para cimentar,
la zapata recomendable es la de menor canto posible.

Por razones constructivas el canto de las zapatas armadas se limita en el código español a un mínimo de 0,35 m, aunque con terrenos ordinarios rara vez se baja de 0,50 m.

Otra limitación del canto viene de la mano del cortante. De acuerdo con los criterios al uso, la comprobación de tracciones por cortante se hace a un canto de la cara del soporte. En ese caso, (véase figura **4**), el esfuerzo cortante tiene el valor $\mathbf{V = p \cdot b \cdot (v - h)}$ y la capacidad a cortante es $\mathbf{V = f_{cv} \cdot b \cdot h}$. Igualando ambos valores se deduce que el canto para no necesitar estribos resulta ser $\mathbf{v/h < 1 + f_{cv}/p}$. Suponiendo que la tensión segura a cortante, $\mathbf{f_{cv}}$ es del orden[2] de 0,35 N/mm² = 350 kN/m², ese valor es:

TABLA 2. CANTO MÍNIMO DE HORMIGÓN ARMADO

Presión del terreno	150	200	250	300	400	kN/m²
Canto mínimo $\mathbf{h_a}$ para no necesitar estribos	0,3·v	0,4·v	0,4·v	0,5·v	0,5·v	

Sucede además que, mientras el canto sea mayor que la mitad del vuelo,[3] se admite que no hay ni siquiera que hacer comprobaciones de tracción de alma por cortante, ya que el

---

[1] Si la zapata es puntiaguda de ese lado, como sucede en las triangulares, el vuelo, referido al vértice, puede ser mayor; por el contrario el vuelo perpendicular al lado de una zapata triangular, debe ser menor. En el caso particular de zapatas circulares, la expresión es $\mathbf{v/h < \sqrt{(f_{cv}/2p)}}$ que conduce a un vuelo 20% mayor que el tabulado.

[2] El problema radica actualmente en el valor de $\mathbf{f_{cv}}$. Con la norma anterior, EH, se trataba de un valor fijo para cada tipo de hormigón; con H175 el valor seguro era 3,3 kp/cm² (0,33 N/mm²). Con la norma actual, EHE, el valor depende no sólo del tipo de hormigón, sino además del canto de la pieza y de la cantidad relativa de armadura longitudinal. La última variable es decisiva, ya que en zapatas la armadura es relativamente muy baja; en la banda de los cantos habituales, difícilmente se supera 0,25 N/mm². El valor es absurdo. En zapatas de hormigón en masa, en las que, por no tener armadura, la regla anterior no puede aplicarse, se les reconoce una resistencia a cortadura como la de tracción del hormigón, que, como se ha indicado, incluso para HM20 es al menos de 0,60 N/mm². El valor adoptado en el texto es prudente, toda vez que, en la práctica, debido a que podría exigir armar con estribos, los cantos menores de la mitad del vuelo son no recomendables.

[3] La norma española usa en ese caso el calificativo de *rígida*, término equívoco ya que es el mismo que se usa en Mecánica del Suelo para clasificar el tipo de reacción del terreno y que se refiere a otras proporciones diferentes.

equilibrio entre la compresión actuante del soporte y la reacción del terreno se produce directamente, con bielas oblicuas enlazadas a tracción en su cara inferior por la armadura, sin necesidad de comprobar ningún otro comportamiento.

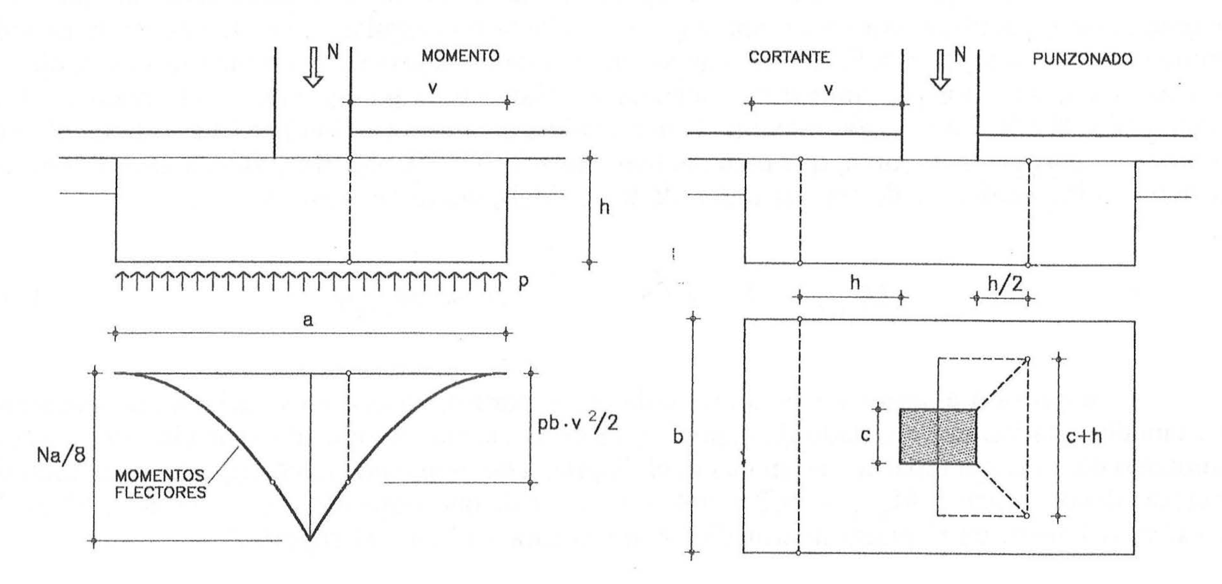


Figura 4. Cortes para comprobación de momento y cortante

La complejidad de estribar la zapata, que no compensa la disminución de canto que se podría conseguir con ello, y las ambiguedades en la aplicación de la formulación de cortante en zapatas, aconseja resolver los dos problemas, resumiendo la tabla 2 en una sola regla:

LEMA: conviene que el canto de una zapata supere la mitad del vuelo

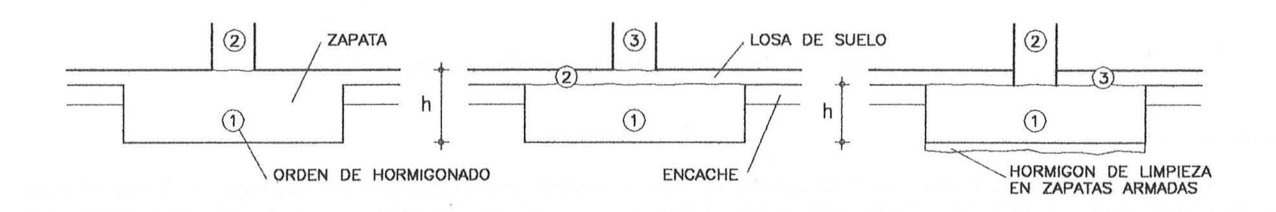


Figura 5. Alternativas de hormigonado de cimientos

Si se hormigona conjuntamente las zapatas con la planta a ras de suelo, (véase figura 5), como canto de la zapata debe tomarse el total. Si se hormigona primero el retallo inferior de las zapatas, luego la planta, pasante por encima de ellas, y en último término los soportes,[1] puede tomarse ese mismo valor, pero, del lado de la seguridad, suele tomarse el del retallo. Si la planta a ras de suelo, aun engarzándola a las zapatas, se construye después de los soportes, como canto de la zapata debe tomarse prudentemente el neto hormigonado en primer lugar.

[1] En el caso de soportes de acero, es conveniente que, por inspección y conservación, arranquen del plano superior de la losa de suelo.

3. Cálculo de la armadura

Para el caso que se considera, —zapata centrada con soporte a compresión simple—, el diagrama de momentos teórico de una zapata de planta rectangular, procedentes de la presión promedio[1] del suelo, **p** = **N/S**, es obviamente una parábola cóncava con un máximo en el eje del soporte, cuyo de valor por unidad de ancho es el clásico $m = p \cdot a^2/8$, que en el ancho total da lugar a $M = N \cdot a/8$. La tracción máxima de la armadura se obtendría dividiendo ese momento por el brazo de palanca disponible, que para los tamaños relativos de soporte y zapata, según muestra la figura **6** izquierda, puede ser del orden de **h**, es decir, como cociente de:

$$M_{max} = N \cdot a / 8 \qquad U \approx M_{max}/z \qquad [2]$$

La expresión anterior no es tan sencilla como parece, ya que **z** es variable, dependiendo del tamaño relativo entre el ladó de soporte y el de la zapata. Adoptando la acción del soporte asimismo como carga repartida en su canto, el diagrama de momentos se corrige con una parábola inversa, dando lugar a $M_{max} = N/2 \cdot a/4 - N/2 \cdot c/4$, que coincide con el momento[2] de la reacción del suelo en el punto intermedio[3] entre la cara y el eje del soporte.[4]

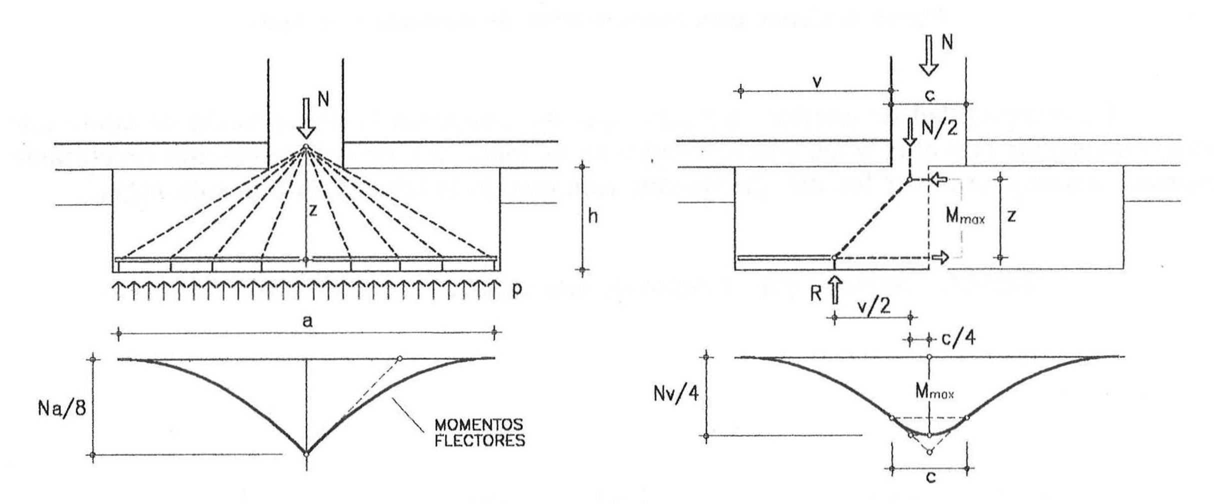


Figura 6. Zapata para compresión simple

---

[1] Para el cálculo de la armadura de la zapata, se tiene en cuenta sólo la compresión del soporte. Tanto el peso de la zapata como el de la planta dispuesta sobre el terreno se equilibran directamente contra él, sin afectar a las solicitaciones de la zapata.

[2] Con zapata circular, la expresión del momento máximo es $N \cdot (0{,}85 \cdot D - c)/8$ siendo **D** el diámetro de la zapata. En el caso de la zapata triangular resulta ser $N \cdot (1{,}13 \cdot b - c)/8$ siendo **b** la anchura de la zapata (no el lado) en la dirección analizada.

[3] La norma EHE, cuando $h > v/2$, dice que debe tomarse a $0{,}25 \cdot c$ de la cara del soporte, y cuando $h < v/2$ que debe tomarse a $0{,}15 \cdot c$. Considerando la acción del soporte tal cual es, el momento máximo se sitúa siempre en el punto medio. Para el segundo caso, el momento sería $M_{max} = N \cdot (v - 0{,}2 \cdot c)/4$, pero no se dice cuál sea el ancho eficaz a momento, que debe tender a ser el del soporte, ni la resistencia efectiva del hormigón en esa zona, que, debido a la compresión tridireccional, puede ser más elevada que la de cálculo habitual, y por tanto no puede deducirse la profundidad de la cabeza comprimida ni el brazo de palanca. Todo indica que, para el cálculo de la armadura, contando con el redondeo posterior, incluso en ese caso, no usado en la práctica, sería suficientemente precisa la [2] o la [3]. La regla de EHE, sin más explicación, no puede aplicarse a muchos de los ejemplos de la figura **3**.

[4] Cuando el soporte es de acero, como canto **c** debiera tomarse un valor menor que el de la placa base pero mayor que el del propio fuste. La regla de la norma española de tomar justamente el valor intermedio entre ambos, se refiere al caso de una sola placa, algo infrecuente en obras de arquitectura en las que suele disponerse una placa recibida en la zapata, y el fuste se acopia rematado con otra placa de tamaño ligeramente inferior.

Contando con que $\mathbf{v} = (\mathbf{a}-\mathbf{c})/2$, queda $M_{max} = N/2 \cdot \mathbf{v}/2$. La tracción máxima[1] de la armadura, **U**, sería el cociente de ese momento y el brazo[2] de palanca, **z**:

$$M_{max} = N \cdot \mathbf{v} / 4 \qquad \mathbf{z} = 0{,}8 \cdot \mathbf{d} \qquad [3]$$

Si el tipo de terreno no propicia contaminación en el proceso de vibrado del hormigón, puede presentarse directamente la armadura en la excavación, pero en ese caso el recubrimiento *a su cara* debe ser de al menos 0,07 m. Con terrenos ordinarios, lo habitual es excavar un poco más,[3] disponiendo previamente una capa de *hormigón pobre*, también denominado *de limpieza*, presentando la armadura con el recubrimiento ordinario a cara de 0,03 m. Si para prevenir la contaminación se dispone una lámina, bastará el último recubrimiento citado.

La sección de armadura total en cada dirección, **A**, se obtiene pues con la expresión:

$$U = M_{max} / \mathbf{z} \qquad A = U / f_s \qquad [4]$$

siendo f_s la tracción segura de la armadura. En la última versión de la norma de hormigón, tal tracción se limita,[4] en cálculo, a 400 N/mm², y por tanto, en condiciones normales de seguridad, la tracción segura no debe superar 260 N/mm².

De [4] y [3] se deduce que $U = N \cdot \mathbf{v} / 4 \cdot 0{,}8 \cdot \mathbf{h}$ de donde:

$$\begin{array}{lll} \text{si } \mathbf{h} = 0{,}5 \cdot \mathbf{v} & U = 0{,}63 \cdot N & \\ \text{si } \mathbf{h} = 0{,}6 \cdot \mathbf{v} & U = 0{,}52 \cdot N & [5] \\ \text{si } \mathbf{h} = 0{,}8 \cdot \mathbf{v} & U = 0{,}39 \cdot N & \\ \text{si } \mathbf{h} = 1{,}0 \cdot \mathbf{v} & U = 0{,}31 \cdot N & \end{array}$$

pudiendo tomar, para una primera aproximación de orden de magnitud, $U = N/2$, e incluso directamente que, en acero B500, la sección de la armadura es del orden de A(cm²) = N(kN)/50

4. Disposición de la armadura

La sección de armadura se debe traducir a un número entero de redondos de un diámetro comercial, siendo aconsejable que el intervalo de disponerlos igualmente espaciados no sea

[1] La condición no depende de las proporciones de la zapata. La norma EHE ofrece la fórmula de cálculo de la armadura de las que tienen $\mathbf{h} > \mathbf{v}/2$, y el método para las otras, que conduce a la misma expresión, ya que ambos métodos, bielas y momento, están basados en el equilibrio.

[2] El valor de **z** en EHE se da en general como 0,85 del *canto mecánico*, igual al total, **h**, menos el recubrimiento al eje de la armadura. Puede comprobarse que, cuando el canto del soporte es del orden de la quinta parte del lado de la zapata, [2] y [3] son equivalentes. Para relaciones muy diferentes de la citada, podría ser conveniente una corrección, como la que hace más adelante en relación a soportes apantallados.

[3] En obras de arquitectura no resulta necesario compactar el fondo de la excavación. El proceso de excavación descomprime el terreno, pero éste se vuelve a comprimir gradualmente a lo largo del proceso de construcción del edificio, reajustándose casi por completo antes de acometer la implantación de unidades de obra delicadas.

[4] La limitación no afecta al acero B400 que tiene una resistencia de cálculo de 350 N/mm², pero sí al acero B500, en el que los clásicos 435 N/mm² se reducen en un 10%.

superior a 0,30 m ni inferior a 0,10 m.[1] Como diámetro mínimo debe tomarse ϕ12 y no es frecuente (véase tabla **3**) tener que acudir a ϕ20 y, menos aún, a diámetros superiores. Con zapatas de canto constante, la armadura se puede disponer de manera uniforme, y con un desarrollo igual a la longitud de la zapata, aunque analizando el equilibrio en más cortes se podría llegar a otras disposiciones diferentes,[2] que, siendo constructivamente más complejas, en general, no suponen una reducción significativa de armadura.

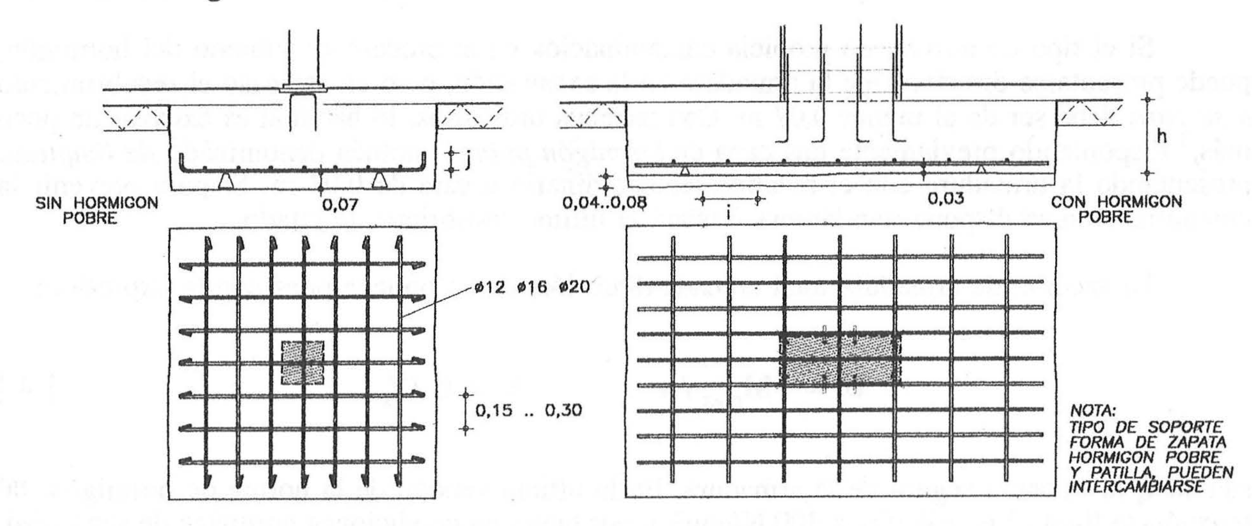


Figura 7. Armado de zapatas

Aunque en el borde de la zapata el momento sea nulo, eso no significa que pueda llegarse a ese punto sin armadura, y tampoco que baste disponerla de lado a lado; puede que falte anclaje. La manera más simple de saberlo[3] es suponer, del lado de la seguridad, que el hormigón no tiene ninguna capacidad a tracción, es decir, que la tensión en las armaduras no puede ser peor que la procedente de un modelo de bielas radiales sin ninguna interacción entre ellas (véase figura **8**).

No es muy difícil verificar que, con ese modelo, y para un soporte idealmente puntual, la ley de tensión es una parábola convexa, con un máximo obviamente igual al obtenido en el apartado anterior. Que a medio vuelo la tensión sea todavía los 3/4 de la máxima, indica que la tensión disminuye mucho más lentamente de lo que predice el diagrama de momentos. Es inmediato que en el extremo es donde la tnsión crece más rápidamente.[4] La manera más simple de evaluar si en esa zona el aumento de tensión rebasa la capacidad de adherencia de la armadura, es suponer, en una nueva simplificación del lado de la seguridad, que la tensión se mantiene constante en el medio vuelo central, disminuyendo linealmente en el medio vuelo extremo; el segundo tramo ajusta a la pendiente máxima en el borde. La regla es pues muy simple:

LEMA: si la longitud básica de anclaje de la armadura supera medio vuelo, conviene rematarla en patilla.

---

[1] La disposición equiespaciada es la más simple, y resulta validada por un análisis de agotamiento dúctil. Un análisis elástico sugeriría concentrarla bajo el soporte, o clarearla en los bordes, véase figura **10**.

[2] Con zapata circular se puede acudir a dos gavillas rectangulares, como muestra la figura **10**. Con una triangular, lo razonable es disponer una cuadrícula isótropa, calculada para la peor dirección de entre las tres; la complejidad de que todas las armaduras sean de distinta longitud hace desaconsejable esta solución de zapata, reservada para cuando haya alguna restricción a las otras formas de planta señaladas.

[3] La norma española impone dos condiciones para averiguar el anclaje que falta; una es, vagamente, la de medirla desde una sección a un canto de la cara del soporte, que, sin indicar qué tensión debe suponerse en ese punto, es papel mojado. Otra viene dada por una fórmula relativa a la sección a medio canto del borde, sin explicar su fundamento, que no es otro que el que se usa en el texto: suponer un modelo radial de bielas. Que, en la norma española, la figura ilustrativa represente fisuras incongruentes con su fundamento, no ayuda mucho a desentrañarla.

[4] La fórmula de EHE, que parece provenir de la propuesta de Eurocódigo, sugiriendo medirla en el último medio canto, resulta más compleja, y sólo permite una ligerísima mejora respecto a la planteada en el texto.

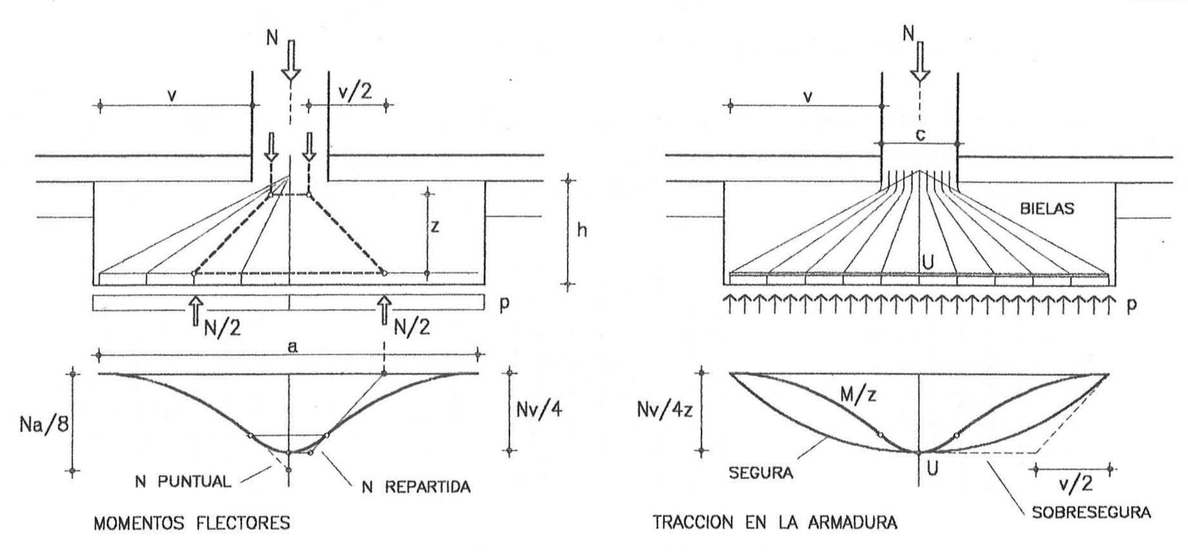


Figura 8. Modelo de bielas en zapatas

Con el criterio habitual, de reducir por 0,7 lo que falte antes de doblar la armadura,[1] la longitud de patilla necesaria es:

$$j = 0{,}7 \cdot (\ell_b - v/2) \qquad [6]$$

siempre que salga positiva. El valor de la longitud básica de anclaje, ℓ_b, para acero B500 y hormigón HA25, es actualmente:

Diámetro de la armadura	ϕ12	ϕ14	ϕ16	ϕ20	mm
Longitud básica de anclaje, ℓ_b	0,30	0,35	0,40	0,60	m

Nótese que la expresión [6] corresponde al, improbable, caso en que la armadura sea la estrictamente indispensable. En la práctica siempre se produce un inevitable redondeo al alza. En ese caso la longitud básica ℓ_b se reduce en la relación de la sección realmente dispuesta y la estrictamente necesaria. Pero sin corrección, la [6] siempre resulta del lado de la seguridad.

En la tabla **3**, confeccionada a partir de las fórmulas precedentes, puede comprobarse que mientras la presión soportable del terreno sea normal, es muy improbable necesitar patilla. Para valores muy elevados de capacidad portante del terreno, resulta recomendable (véase figura **9**) no sólo la patilla sino incluso una armadura perimetral amparada en ella,[2] y en último caso, en roca, podría ser incluso conveniente la disposición de sólo un anillo perimetral, remedando la forma de los estribos del soporte, que es lo que se hace cuando el cimiento es un pilote.

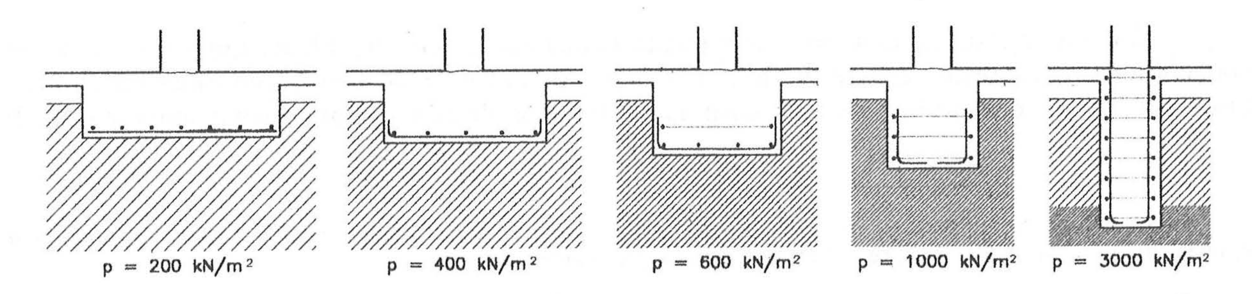


Figura 9. Patrones de armado

[1] La simplificación sobresegura de la figura **8** representa un margen adicional para cubrir variaciones de la función de presión del suelo peores que la uniforme.

[2] La recomendación figura en EHE, que la refiere ambiguamente a "zapatas con cargas portantes apreciables". Por lo deducido, probablemente se refiera a valores altos de **p** y no de **N**

5. Otras formas de zapata centrada

Si los vuelos[1] en ambas direcciones de una zapata son diferentes, resulta, según [3], armaduras estrictas proporcionales a los mismos.[2] En esos casos suele resultar constructivamente más sencillo adoptar en ambas direcciones la armadura pésima: la del vuelo mayor.

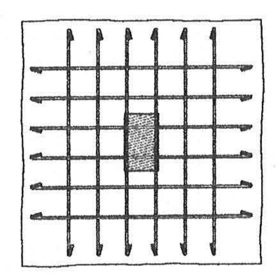
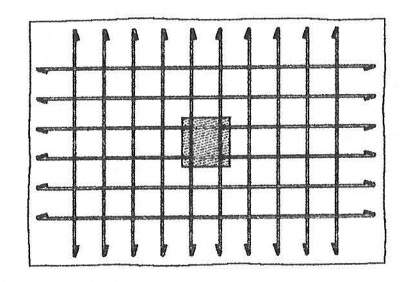
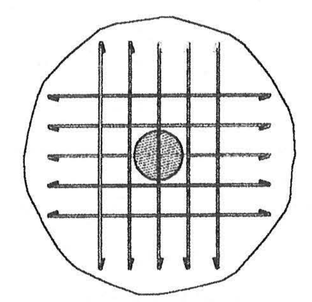




Figura 10. Armados posibles

Cuando el soporte tiene sección apantallada, —es decir, un lado anormalmente grande— aunque el punto de momento y tracción máximas sigue siendo el centro, el valor de **z** puede ser netamente mayor que lo indicado en [3], que procede de considerar que las bielas del soporte son estrictamente paralelas hasta su entronque con la zapata, o lo que es lo mismo, convergiendo todas las de la zapata en el mismo punto del eje del soporte.[3]

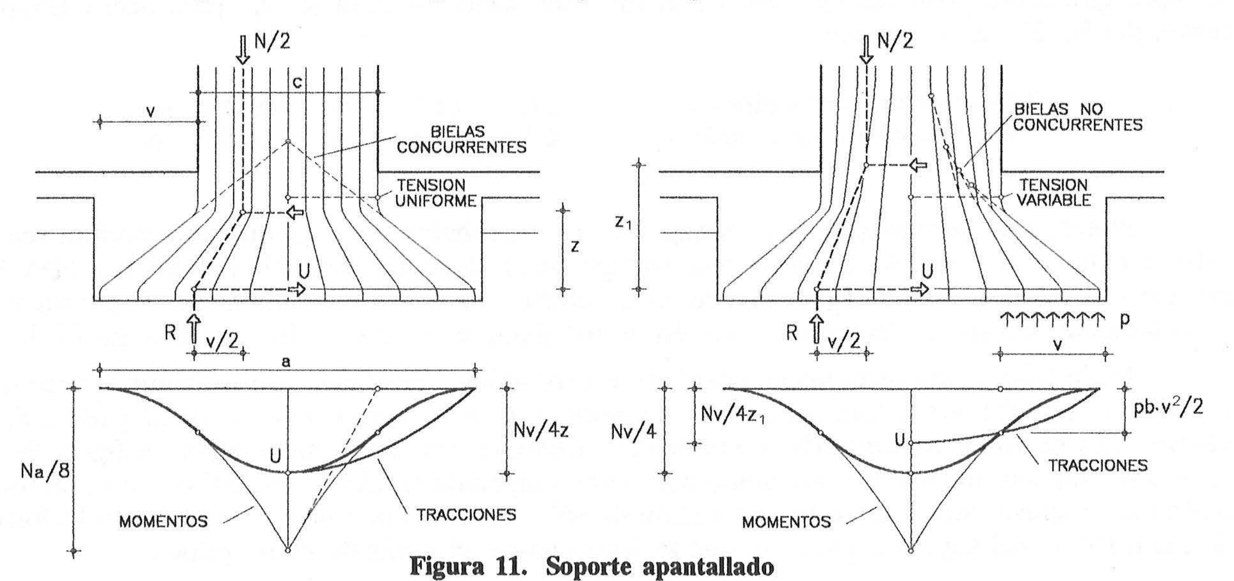


Figura 11. Soporte apantallado

Con un soporte apantallado, éste puede comenzar a abrir las bielas mucho más arriba, concentrando compresión en sus bordes.[4] Las bielas de la zapata no convergen todas en un mismo punto. Puede comprobarse en ese caso que la tracción de la armadura apenas aumenta tras la

---

[1] Para las combinaciones de formas de la figura **3**, a los efectos de las fórmulas y tablas precedentes, como vuelo, **v**, puede tomarse la distancia entre el borde de zapata y el borde de soporte.

[2] Si, en alguna dirección, el canto resulta menor que la mitad del vuelo, además de que probablemente haya que armar a cortante, puede entrar también en crisis la distribución uniforme de armadura longitudinal. Según EHE, en ese caso, en la zona próxima al soporte debería disponerse una densidad doble que en el resto.

[3] A cambio, debido a la probable concentración de presión en los bordes de la zapata, conviene ser algo más prudente en la evaluación de la distancia a que actúa **R**, que puede ser algo mayor que lo acotado en la figura.

[4] En la sección de entronque de soporte con la zapata, la compresión debe ser centrada y con distribución simétrica, pero eso no significa que tenga que ser uniforme. Las fórmulas de Resistencia de Materiales dejan de ser válidas a uno o dos cantos de cualquier discontinuidad, por ejemplo, en un cambio brusco de sección, como es el caso.

vertical de la cara del soporte, por lo que, a efectos prácticos, se puede adoptar, como momento máximo unitario, el valor **p·v²/2**, obteniendo la armadura de:

$$\mathbf{M_{max} = p \cdot b \cdot v^2 / 2} \qquad \mathbf{z = 0{,}8 \cdot h} \qquad [\,7\,]$$

lo que permite reducir notablemente la obtenida con [3]. Dimensionando la zapata con vuelo uniforme en derredor del soporte se necesita, según [7], una armadura isótropa, que es lo recomendable. El uso de [3] es, en este caso, una simplificación del lado de la seguridad para la armadura de la zapata, pero en contra de la seguridad del soporte. No se puede evitar que el soporte tienda a concentrar compresión en sus bordes, por lo que, en hormigón, siempre conviene confinar adicionalmente esa zona, densificando el estribado en el entronque con la zapata.

6. Zapatas poco armadas, en masa y sobre pozos

Si con el canto deseable, —el mínimo—, no se alcanza el terreno sobre el que se pretende cimentar, debe excavarse al menos hasta llegar hasta él, pero de acuerdo con lo ya obtenido, de que lo más rentable es el canto menor posible, no hay que profundizar más.

> *LEMA: Una vez superado el canto mínimo de la zapata, nunca es recomendable excavar más de lo que se necesite para alcanzar el terreno firme.*

Cuanto más canto tenga la zapata, menos armadura necesita. La **Tabla 3** presenta los resultados de una gama completa de zapatas simples cuadradas, para varias presiones de suelo, cargas y cantos. Si, para llegar al firme, el canto es cercano al valor $\mathbf{h_m}$ de la **Tabla 2**, puede ser rentable aumentarlo hasta llegar a ese valor, para poder realizar la zapata en masa, con hormigón de clase HM20, más barato que el HA25, que es el que debe usarse en las armadas.

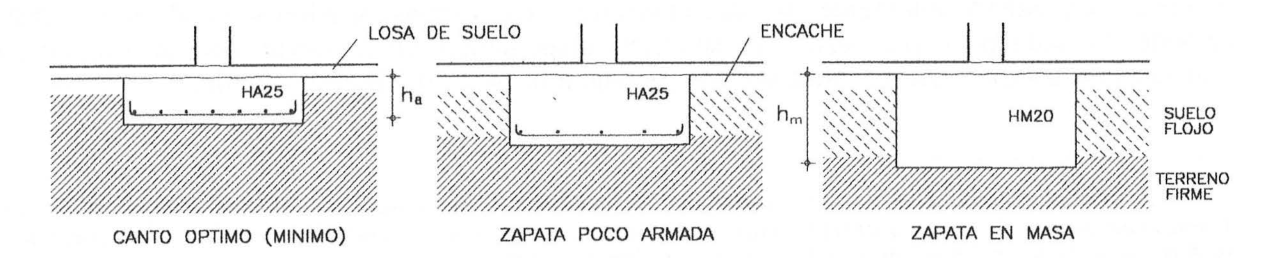


Figura 12. Incidencia de la profundidad del firme

Puesto que el canto $\mathbf{h_m}$ (Tabla **1**) es mucho mayor que el mínimo $\mathbf{h_a}$ (Tabla **2**), se deduce que la zapata de hormigón en masa está todavía en mejores condiciones a cortante que la armada, por lo que huelga en ella toda comprobación de tensiones tangenciales.[1]

Si la zapata tiene en una dirección el vuelo correspondiente a hormigón en masa y en la otra a hormigón armado debe realizarse en HA25. Además suele ser recomendable dotarla en la dirección en que no la necesita, de una armadura con densidad al menos cuarta parte de la obtenida por cálculo en la otra. Salvo esta precisión, y puesto que siempre se puede acudir a la solución en masa, nada obliga a una armadura mínima[2] en zapatas.

[1] No sólo de cortante. Según la norma española el punzonado debe comprobarse a medio canto de la cara del soporte. Aun para soporte idealmente puntual, la sección resistente (véase figura **4**) es de **4h²**, que debe soportar un esfuerzo tangencial de $\mathbf{p \cdot a^2 - p \cdot h^2}$, lo que lleva a la condición de que $\mathbf{v/h} < \sqrt{(1/4+\mathbf{f_{cp}}/\mathbf{p})}$ que, con una tensión segura de hasta 1200 N/mm², como indica la norma, conduce sistemáticamente a permitir un canto mucho menor que $\mathbf{h_m}$. La conclusión es que la comprobación de punzonado queda también automáticamente cubierta por la de flexión.

[2] Sin embargo, por inercia, sigue apareciendo en proyectos, informes y manuales la cita a una armadura mínima en zapatas, inexistente en la normativa actual.

Si el suelo sobre el que se pretende cimentar se encuentra a más profundidad[1] que $\mathbf{h}_m$, puede acudirse a la solución de *pozo*, limitada a la profundidad alcanzable con medios ordinarios de excavación, como tres veces el ancho de la zapata, o cuatro o cinco metros.

El pozo puede rellenarse completamente de hormigón en masa, de clase HM20. Cabe también[2] rellenar parcialmente el pozo con hormigón *pobre*[3] o *ciclópeo*,[4] reservando en cualquiera de los dos sistemas, una altura $\mathbf{h}_m$ o $\mathbf{h}_a$ para disponer encima una zapata de hormigón en masa o armada respectivamente. La determinación del canto de la zapata propiamente dicha y en su caso del armado, pueden hacerse a partir de una presión soportable en la superficie de unión con el pozo, muy superior a la de su fondo, aunque, por motivos prácticos se acabe hormigonando toda la planta del mismo.

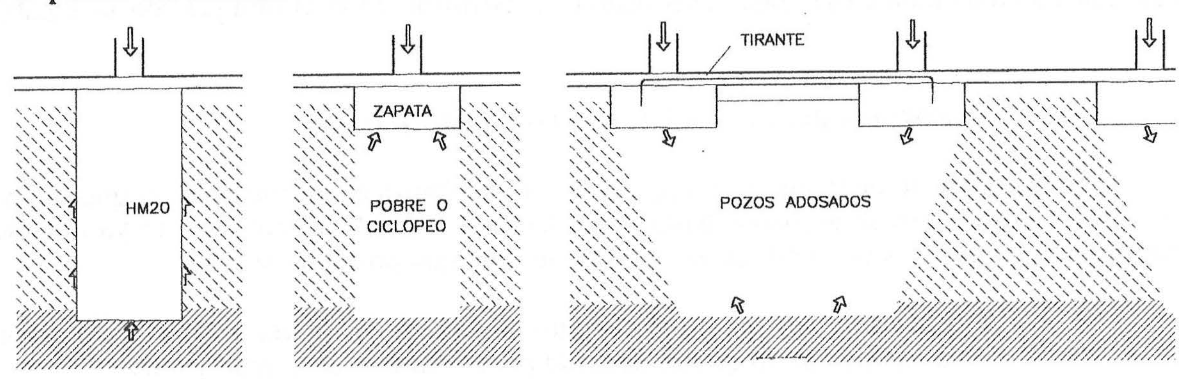


Figura 13. Soluciones de pozos

En cualquier caso, en el dimensionado de la planta del pozo no se puede despreciar así como así la carga debida a su propio peso, al menos en lo que supone de incremento respecto al terreno que sustituye. Este proceso exige proceder por tanteos o iterativamente.[5]

Debido a que la máquina con la que se excavan los pozos trabaja mejor en línea, y produce casi indefectiblemente paredes ataluzadas, en muchas ocasiones puede ser rentable disponer un sólo pozo para cada dos soportes, disponiendo, en la zapata común a ambos, la armadura de tracción que canaliza las dos fuerzas a la base común en el fondo.

---

[1] Lo que se discute aquí es sólo acerca de las condiciones mecánicas de las zapatas por sí mismas, independientemente de lo que aconsejen otras condiciones del suelo, como las del nivel freático, o la existencia de arcillas expansivas, aspectos que se estudian en una disciplina distinta.

[2] En una interpretación prudente de los efectos del *desparrame* de las tensiones del soporte en el pozo, éste debiera armarse, a una profundidad del orden del vuelo, para soportar una tracción del orden de $\mathbf{U} = 0{,}25 \cdot \mathbf{N}$ que representa el límite de la [5]. La regla procede del problema de cargas sobre macizos; en los pozos se cuenta con la ventaja del confinamiento que produce el terreno.

[3] Hormigón no estructural, con muy poca dosificación de cemento, destinada a alcanzar una resistencia en la banda de unos 5 N/mm² (5000 kN/m²)

[4] Aglomerado formado por bolos o grava de gran tamaño, vertido por tongadas, para evitar la formación de cavernas que inducirían asientos, mezcladas con lechada. El conjunto forma un terreno mejorado, con una presión soportable que fácilmente supera 1000 kN/m².

[5] Por ejemplo, si el soporte tiene una compresión de 700 kN, y el terreno admite 250 kN/m² pero a 5 m de profundidad, un primer tanteo arrojaría una superficie de 700/250 = 2,8 m², con lo que el pozo pesaría 2,8×5×25 = 350 kN, que es un incremento nada desdeñable; eso significa el redimensionado para un total de 700+350 = 1050 kN, es decir un pozo de 1050/250 = 4,2 m² cuyo peso es de 4,2×5×25 = 560 kN, lo que significa un nuevo cálculo con 700+560 = 1260 kN que supone 1260/250 = 5 m², o sea un peso de 5×5×25 = 625 kN, que sugiere no seguir iterando más. Considerando como peso el añadido al del terreno, con una densidad diferencial de 25–17 = 8 kN/m³, el incremento del tanteo inicial sería de 2,8×5×8 = 110 kN, lo que da lugar a una carga total de 910 kN, lo que supone un pozo de 810/250 = 3,2 m² que sólo supone un incremento de peso de 3,2×5×8 = 130 kN, cuya diferencia con lo supuesto es suficientemente pequeña como para dar el resultado por definitivo. Sobre este tema no parece haber acuerdo unánime, toda vez que, debido al amplio desarrollo de la superficie lateral del pozo, podría no ser despreciable el rozamiento entre éste y el terreno, permitiendo que parte de la carga se transfiera al terreno oblicuamente a través de las caras laterales del mismo.

TABLA 3. ZAPATAS CUADRADAS CENTRADAS

Presión del terreno (kN/m²)		150	200	250	300	400	
Compresión del soporte (lado del soporte)							**i(m)**
500 kN (0,25m)	lado **a** (m)	**1,80**	**1,60**	**1,40**	**1,30**	**1,10**	
canto	0,35	–	10ϕ12	9ϕ12	8ϕ12 p	8ϕ12 p	0,15
h	0,45	9ϕ12	8ϕ12	7ϕ12	6ϕ12 p	5ϕ12 p	0,20
(m)	0,60	6ϕ12	6ϕ12	6ϕ12	5ϕ12 p	*	0,25
	0,65	*	*	*	*	*	
700 kN (0,30m)	lado **a** (m)	**2,20**	**1,90**	**1,70**	**1,50**	**1,30**	
canto	0,40	–	14ϕ12	13ϕ12	12ϕ12	10ϕ12 p	0,15
h	0,50	12ϕ12	11ϕ12	10ϕ12	8ϕ12	8ϕ12 p	0,20
(m)	0,70	10ϕ12	8ϕ12	7ϕ12	6ϕ12	*	0,25
	0,75	*	*	*	*	*	
1000 kN (0,35m)	lado **a** (m)	**2,60**	**2,20**	**2,00**	**1,80**	**1,60**	
canto	0,50	–	14ϕ14	12ϕ14	11ϕ14	10ϕ14	0,15
h	0,60	12ϕ14	10ϕ14	9ϕ14	8ϕ14	8ϕ14	0,20
(m)	0,80	10ϕ14	8ϕ14	7ϕ14	6ϕ14	6ϕ14	0,25
	0,90	*	*	*	*	*	
1500 kN (0,40m)	lado **a** (m)	**3,20**	**2,80**	**2,40**	**2,20**	**1,90**	
canto	0,60	–	18ϕ16	17ϕ16	16ϕ16	14ϕ16	0,14
h	0,80	14ϕ16	12ϕ16	12ϕ16	11ϕ16	10ϕ16	0,19
(m)	1,00	10ϕ16	10ϕ16	9ϕ16	8ϕ16	7ϕ16	0,24
	1,20	*	*	*	*	*	
2000 kN (0,45m)	lado **a** (m)	**3,60**	**3,20**	**2,80**	**2,60**	**2,20**	
canto	0,70	–	14ϕ20	20ϕ16	19ϕ16	18ϕ16	0,13
h	0,90	12ϕ20	10ϕ20	16ϕ16	15ϕ16	14ϕ16	0,18
(m)	1,10	10ϕ20	8ϕ20	12ϕ16	12ϕ16	10ϕ16	0,23
	1,20	*	*	*	*	*	

Hormigón HA25, acero B500S, control normal
El intervalo, **i**, es meramente orientativo, válido sobre todo para interpolar
– : el canto puede ser inferior a la mitad del vuelo, por lo que podría necesitar estribos
p : la armadura debe rematarse en patilla
* : la zapata puede ser de hormigón en masa, HM20
Si el lado del soporte es superior al indicado, la armadura puede reducirse.
Si, cuando la zapata no puede ser en masa, se desea disponer una armadura mínima, tal como del 1,8‰, esta condición gobierna los casos con canto superior al mínimo, resultando:

canto **h** (m)	0,50	0,60	0,80	1,00
armadura	ϕ16/0,20	ϕ16/0,15	ϕ16/0,12	ϕ16/0,10

8. Zapatas de canto variable

Aunque la solución constructivamente más simple y eficaz, una vez realizada una excavación de zapata, es la de canto uniforme, en ocasiones, las condiciones en derredor de la misma imponen cambiar su canto de unos puntos a otros.

El caso más simple es el de zapata bajo rampa de garaje. La pendiente obliga a que el canto sea menor en un borde que en otro. Con el modelo de bielas de la figura **8**, puede comprobarse que dicha zapata debe calcularse a partir del canto en la acometida con el soporte por su cara inferior. Por equilibrio y simetría, en la parte de más canto puede identificarse una zona no eficaz.

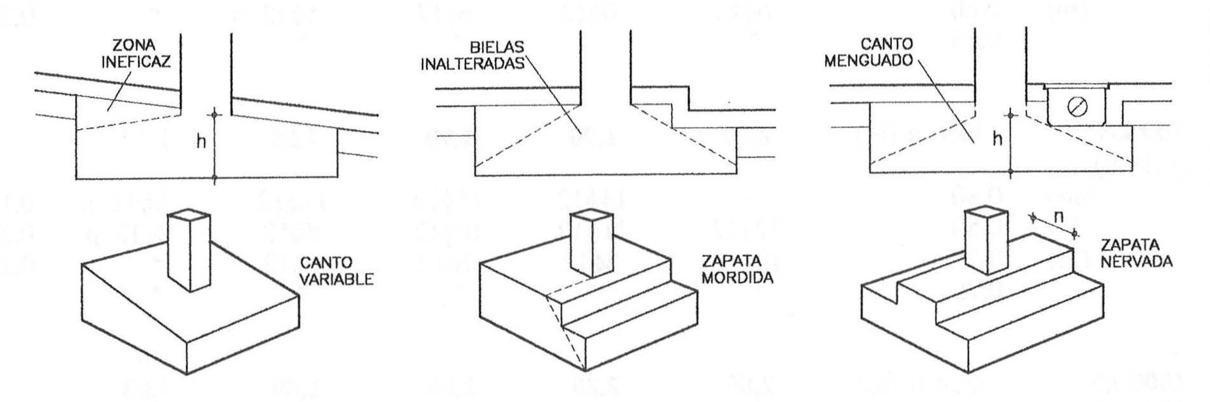


Figura 14. Zapata de rampa y escalonada

Cuando una línea de conductos enterrados discurre próxima a un soporte, o cerca de un salto de nivel de la losa de suelo, la zapata neta está recortada. Mientras el muerdo no intersecte el patrón de bielas de la figura **8**, la zapata se calcula como normal; en otro caso debe considerarse que tiene canto menguado en esa dirección, o proceder con bielas no concurrentes o quebrantadas, como en el caso del soporte apantallado. En ocasiones se busca deliberadamente la forma con nervio en una zapata alargada, con objeto de repartir mejor la carga en la dirección larga a base de mucho canto. Si en la dirección de canto mayor se necesita armadura,[1] ésta puede distribuirse en el ancho del nervio más un canto del escalón a cada lado, que en muchos casos puede significar un reparto casi uniforme. En la dirección corta, el vuelo y canto se miden en el escalón. Es regla general disponer como armado mínimo en una dirección una densidad no menos de la cuarta parte de la de la otra.

En la fachada de edificios exentos sin sótano, es común que, aun pudiendo disponer la zapata centrada con el soporte, la parte exterior deba tener un plano rehundido, para permitir la solera exterior de acera a una cota inferior a la del edificio, o una mínima capa de terreno vegetal hasta la alineación. En muchos casos, aunque se hormigone con canto variable, resulta más sencillo obtener la armadura, del lado de la seguridad, a partir del canto menor.[2] En el caso de soportes de esquina, sucede eso en las dos direcciones. Si el muerdo interesa el patrón de bielas directas, la armadura máxima debe deducirse de un sistema quebrantado, como el del caso del soporte apantallado, incrementando al momento del escalón exterior, con el del resto de carga pero con canto total.

---

[1] Nótese que, tanto para esta comprobación como para la de cortante, no pueden utilizarse directamente las tablas **1** y **2**. Debido a que el nervio concentra la carga de una dirección, debería entrarse con el valor de **p·a/n**. En general este tipo de zapatas se arman siempre, y en la dirección del nervio, en ocasiones, hasta a cortante, calculándolo como una viga.

[2] La opción de disponer la zapata con el canto ordinario, pero por debajo del rehundido, sobre todo en el caso de *foso* de ascensor que ve más adelante, conduce en muchos casos a interferencia de bulbo con las adyacentes, originando otros problemas en cascada, por lo que no suele ser una solución recomendable.

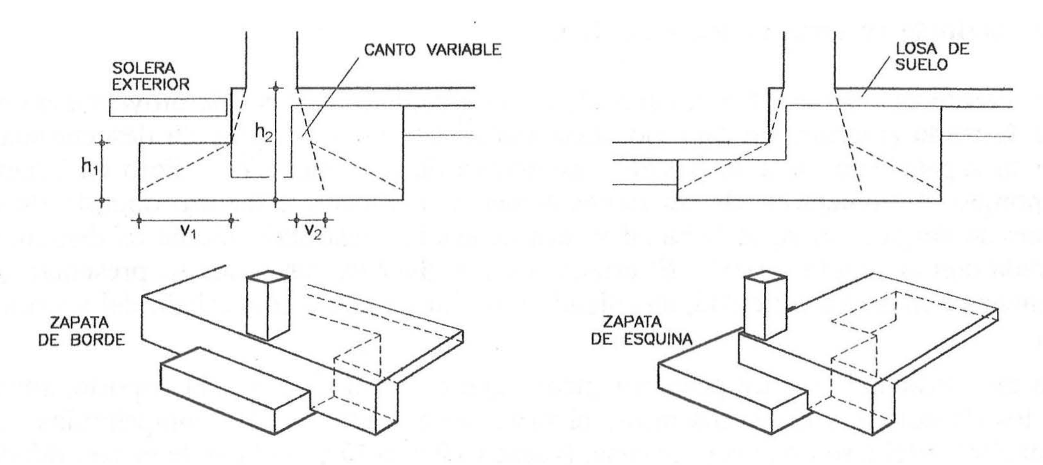


Figura 15. Zapatas escalonadas

Es muy habitual que el ascensor se disponga cerca de un soporte. La arqueta o *foso* necesario por seguridad, tallado en la zapata significa canto variable. El conjunto de casos es muy variopinto. La superficie de la zapata puede obtenerse con la ley general. Bajo el plano de fondo del foso, la zapata queda reducida a una losa, para la que no es aconsejable bajar de 0,30 m de grueso. El cálculo de la armadura debe hacerse por separado para la zona de losa y para el resto de la zapata, adoptando un modelo de nervios cruzados, en general simétricos, que lleven definitivamente la reacción del terreno a la vertical del soporte.

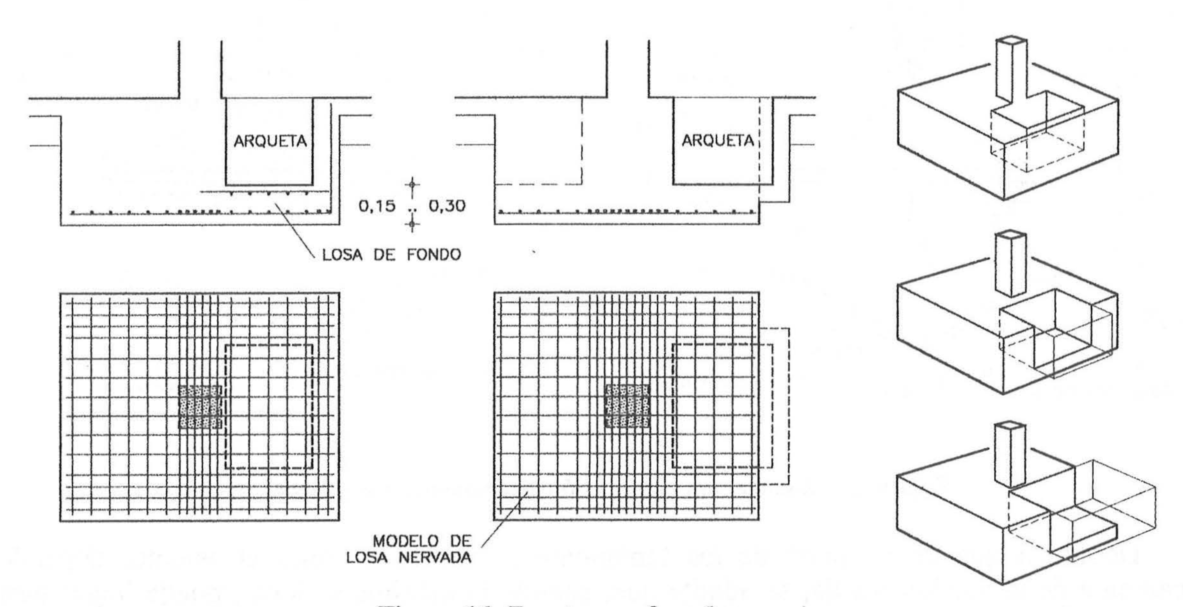


Figura 16. Zapata con foso de ascensor

La figura **16** presenta algunos casos típicos de este problema. Como es fácil deducir, el más benigno es aquél en el que el foso cabe enteramente dentro de la zapata, permitiendo incluso la disposición de una tabica tipo muro en el borde exterior de la misma. El peor, por supuesto, muy parecido al del salto visto en la figura anterior, es el que muerde sólo y parcialmente, una esquina de la zapata. En muchos casos, el comportamiento de losa del fondo del foso, impone como conveniente armadura inferior y superior, pero nada obsta a, si se produce equilibrio, dotarle de sólo una de ellas. Tras el cálculo de la armadura local del fondo, como losa sustentada en los bordes que proceda, y la general de la zapata, a partir, en lo que se pueda, del canto total, o de cruces equilibrados de nervios con el canto disponible, nada se opone, y en muchos casos será lo más acertado, a disponer una cuadrícula uniforme con la densidad suma de ambas. En los paramentos del foso que limitan con la zapata no necesariamente, pero en las tabicas tipo muro sí es conveniente disponer armaduras calculadas para el trabajo como vigas de canto.

2.1.2 Soporte en compresión excéntrica

Si el soporte está sometido a compresión excéntrica, la zapata podría proyectarse con los criterios del apartado anterior, sin casi modificaciones,[1] con tal de disponerla descentrada, con el centro de la zapata bajo el de la posición excéntrica de la compresión.[2] Pero en general, y sobre todo porque el momento suele ser frecuentemente cambiante, e incluso opuesto de signo de unos casos de carga a otros, lo habitual y recomendable constructivamente es disponer una zapata centrada con el propio soporte. El estudio de los diversos casos que se presentan puede hacerse de menos a más excentricidad, atendiendo a su valor en relación al lado del soporte o el de la zapata.

Si la excentricidad es muy pequeña, menor que el sexto de lado del soporte, situación habitual de los de edificios de varios pisos, el fuste tiene ambos bordes comprimidos. Como respuesta asimétrica del terreno puede tomarse, (véase la figura **17**), del lado de la seguridad, una ley lineal[3] de presiones. Si las solicitaciones en la base del soporte a cimentar son **N** y **M**, las presiones extremas, despreciando el peso de la zapata, valen $p_{max,min}$ = **N/S ± M/W**, que en zapata rectangular es:

$$p_{max,min} = N / a \cdot b \pm M / 0{,}17 \cdot a^2 \cdot b \qquad [8]$$

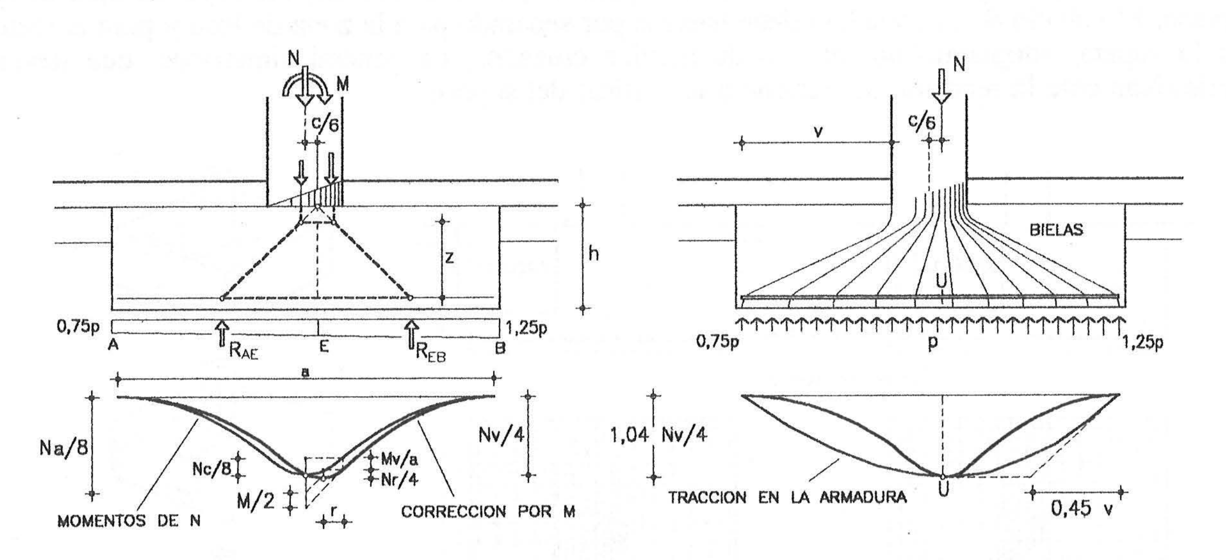


Figura 17. Soporte con compresión ligeramente excéntrica

Debido a que buena parte de los fenómenos a controlar, como el asiento, dependen básicamente de la tensión media, se admite que, cuando la máxima es local, puede llegar hasta 1,25 veces la soportable. La existencia de momento no tiene pues influencia en el cálculo de la sección cuando **M**·/0,17·**a²b** < 0,25·**N/ab** o sea cuando **M/N** < **a**·0,17·0,25/6, es decir cuando sea **e** < 0,04·**a**, siendo **e** la *excentricidad* de la compresión, o valor **M/N**. Como el lado, **a**, de la zapata, es del orden de 5 veces el canto **c** del soporte, la condición equivale a **e** < 0,2·**c**, que es

---

[1] Las modificaciones corresponden a la disposición de los enlaces del soporte a la zapata, coloquialmente conocidas como *anclajes*, aunque las más de las veces son sólo *esperas*, y que se ven en un apartado posterior.

[2] En rigor a la resultante de las solicitaciones del soporte corregidas con el peso de la propia zapata. Este matiz, y la solución de zapata descentrada se ve más adelante.

[3] Como la presión bajo cada punto depende de su descenso, tiende a ser mayor del lado de la excentricidad, aunque superponiéndose ese efecto con el general de concentración en los bordes. Puesto que en cualquier caso, la resultante debe coincidir en posición con la acción del soporte, una ley simplemente lineal debe reputarse de suficientemente segura, tal como lo establece sin ambages la norma española del hormigón.

aproximadamente cuando el soporte tiene ambos bordes comprimidos,[1] por lo que puede decirse:

LEMA: si el soporte está en compresión excéntrica, la zapata puede dimensionarse prescindiendo de su momento

La armadura sí se ve afectada por el momento, sea cual sea su valor. Considerando las solicitaciones **N** y **M** en el eje del soporte, el diagrama de momentos de la zapata debe presentar un salto de valor **M** en ese punto, y por tanto una alteración de valor **M/2** en más y en menos respecto al procedente de **N**. Como el reparto real de la carga reduce el momento máximo según [3], el incremento no supera **M/4**. De acuerdo[2] con lo acotado en la figura **17** resulta:

$$\mathbf{M_{max}} = \mathbf{N} \cdot \mathbf{v}/4 + \mathbf{M}\,(\mathbf{v}/\mathbf{a} - 1/4) \qquad [\,9\,]$$

La figura **18** muestra el caso de una excentricidad mayor, casi al extremo del soporte. En este caso, en el dimensionado de la zapata no puede ignorarse el momento, debiéndose usar la [8], limitando la tensión máxima a 1,25 veces la presión soportable de referencia. Cuando el soporte es de fábrica, (viñeta izquierda), el soporte actúa con sólo compresiones, pegadas a un borde. Cuando el soporte es de hormigón armado, esa excentricidad produce tracciones en el borde del soporte opuesta a la carga. Pero salvo una alteración local en ese punto, las solicitaciones y el armado necesarios, regidos por [9] son los mismos en ambos casos.[3]

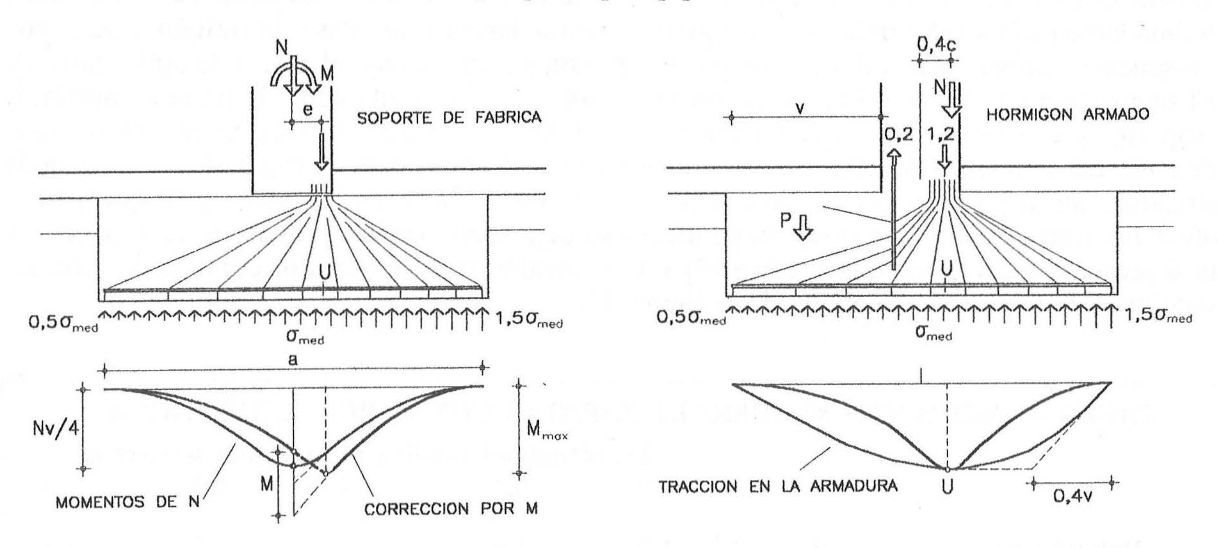


Figura 18. Excentricidad al borde del soporte

En edificios de pisos, sobre todo cuando hay varios, es muy poco probable que el soporte se encuentre en la banda de excentricidades medias, saltando rápidamente de la compresión casi centrada a la de soporte sometido a fuerte flexión compuesta, con un borde del soporte claramente

[1] Con soportes de hormigón, el valor que se obtiene oscila entre 0,28·**c** para suelos poco resistentes (**p** = 150 kN/m²) y 0,18·**c** para los muy resistentes (**p** = 400 kN/m²).

[2] Si la punta de presión debida a momento es menor que el 25% de la de la compresión, la resultante ene media zapata de la presión procedente de **M** es inferior a la octava parte de la de **N**; debido al mayor brazo de la primera, el segundo sumando de [9] no puede superar un 17% del primero. En el caso de la figura **17**, el momento máximo no supera ni en un 5% el término fundamental N·v/4. El incremento de la armadura de la zapata debida al momento del soporte suele estar cubierto de ordinario por el redondeo en la definición de la misma.

[3] El anclaje de la armadura del soporte por adherencia en vertical se demora hasta penetrar en el paquete de bielas, y sólo puede darse en la medida en que lo permite el pequeño quebranto de las mismas. Con este rango de excentricidad, alguna de las bielas debe equilibrarse contra el peso de la parte exterior de la zapata, variable que empieza a tener influencia en su armado en tanto que el peso es uniforme mientras la presión del suelo deja de serlo. Debido a estas limitaciones, la capacidad en vertical suele ser insuficiente para dar cuenta de la tracción de las armaduras del soporte. Lo usual es proceder como se indica en el caso siguiente.

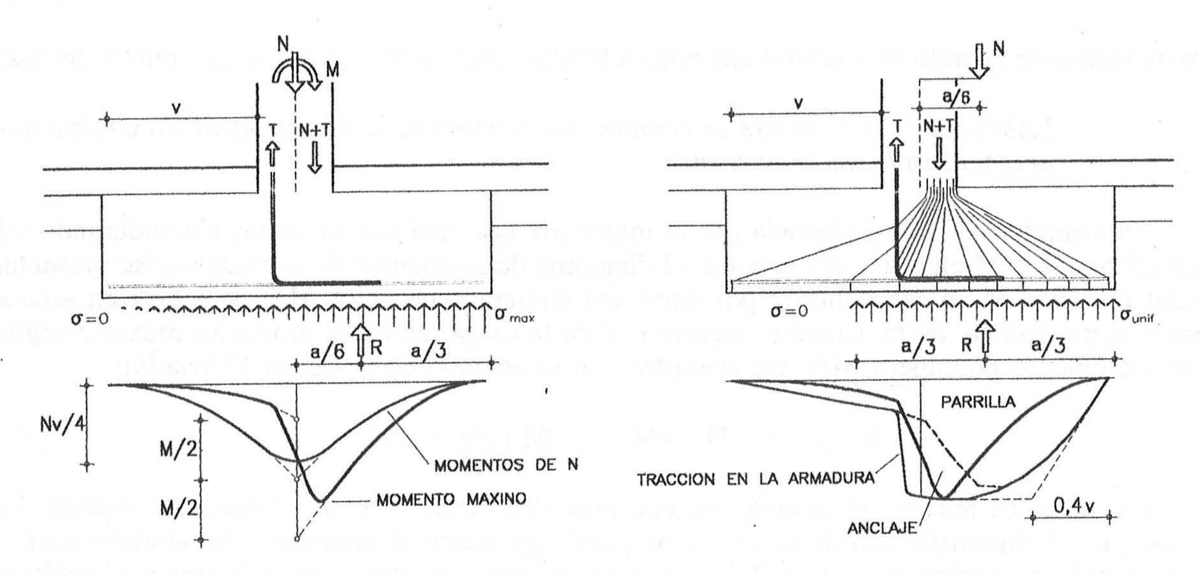


Figura 19. Soporte en flexión compuesta

Si la excentricidad es mayor que medio canto del soporte, pero menor que el sexto del lado de la zapata, [8] predice que ésta sigue presionando al terreno en todos sus puntos. La figura **19** ilustra el caso límite, en el que la zapata admite N = 1,25·**pab**/2, es decir N = 0,62·**pab**, aproximadamente N = 0,67·**pab**, lo que sugiere, como se hace en fábricas y hormigón, operar con una respuesta *equivalente,* uniforme, de presión **p**, con su centro bajo el punto de aplicación[1] de N. El punto de momento máximo de la zapata se sitúa bajo la resultante de la parte comprimida del soporte, y el valor tiende rápidamente a **Nv**/4 + **Mv**/**a** – **Nc**/20. El incremento de tracción procedente del momento del soporte se traduce en un salto brusco de la capacidad mecánica de la armadura de la parrilla, que se descompone en la que subiste en la zapata y la que pasa a resolver las tracciones del soporte,[2] cuyo efecto se deja sentir hasta el fondo de la zapata.[3] La tabla **4** presenta los valores que predice [9] y la expresión de este párrafo, combinadas con las correcciones de soporte apantallado de la figura **11**.

TABLA 4. MOMENTO MÁXIMO DE ZAPATAS CON CARGA EXCÉNTRICA

		Excentricidad relativa al canto del soporte e/c				
		0,0	0,2	0,4	0,7	1,0
Relación de	0,1	1,0	1,0	1,1	1,2	1,4
lado de soporte	0,2	1,0	1,1	1,2	1,3	1,7
a zapata	0,3	0,9	1,0	1,2	1,4	2,0
c/a	0,4	0,8	0,9	1,2	1,8	2,3
		Momento máximo de la zapata relativo a N·v/4				

[1] Por extensión, ese modelo también puede usarse en los casos anteriores. Ahora, para usar las tablas **1** y **2**, puede entrarse con la presión máxima, o a lo sumo con una intermedia entre ésta y la de cara del soporte. A efectos de cortante, el valor equivalente se aproxima aún más a la presión máxima, pero, como se deducía allí, un canto de al menos mitad del vuelo zanja todas las cuestiones.

[2] Sin embargo, en los detalles publicados, resulta frecuente encontrar anclajes con la disposición inversa, es decir con patillas hacia afuera, que no pueden corresponder nunca a armaduras traccionadas.

[3] El diagrama de la figura citada representa la tracción *media* de las armaduras de esa dirección. A tenor del ancho traccionado del soporte, y de la disposición en planta de sus anclajes, cabría distinguir la necesidad *local* de tracción de la zapata en la banda de soporte de la de las laterales, seguramente menos solicitadas. El análisis de este problema sugiere disponer la armadura de la zapata de manera no uniforme, y desparramar la parte horizontal de los anclajes lo más posible, imbricados con la máxima cantidad de armadura de parrilla que se pueda. La literatura técnica al uso no tiene por ahora propuestas normadas al respecto, limitándose a recomendar cuadrícula uniforme.

Si la excentricidad supera **a**/6, la zapata se despega por deformación de tracción en el borde opuesto a la carga. Suponiendo presión lineal, la regla de dimensionado es la de disponer por fuera de la trayectoria de la compresión, un valor **s**, tal que **N**/3**sb** < 1,25**p**/2, o lo que es casi lo mismo, suponiendo una respuesta *equivalente* uniforme, que:

$$N / 2s \cdot b < p \qquad [10]$$

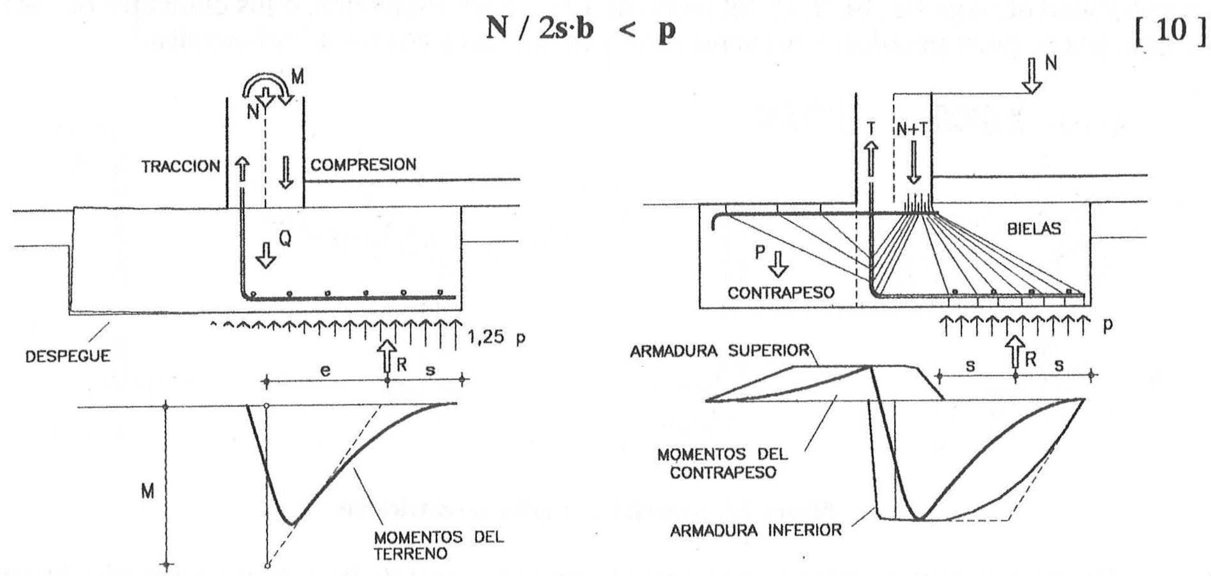


Figura 20. Carga fuertemente excéntrica

La parte despegada del suelo pesa, pero no recibe reacción del terreno, de manera que se *cuelga* del resto. En este caso como excentricidad debe tomarse la de la reacción del terreno, es decir:

$$e = M / (N + Q) \qquad [11]$$

y el dimensionado[1] de la zapata debe hacerse por tanteos,[2] ya que su peso **Q**, depende a su vez de **s**. El momento máximo de la zapata no puede superar el del soporte, **M**. En el lado despegado, el contrapeso provoca momentos negativos y consecuentemente armadura superior como se indica en la figura **20**, que debe estar pinzada bajo el soporte y anclada en el extremo.

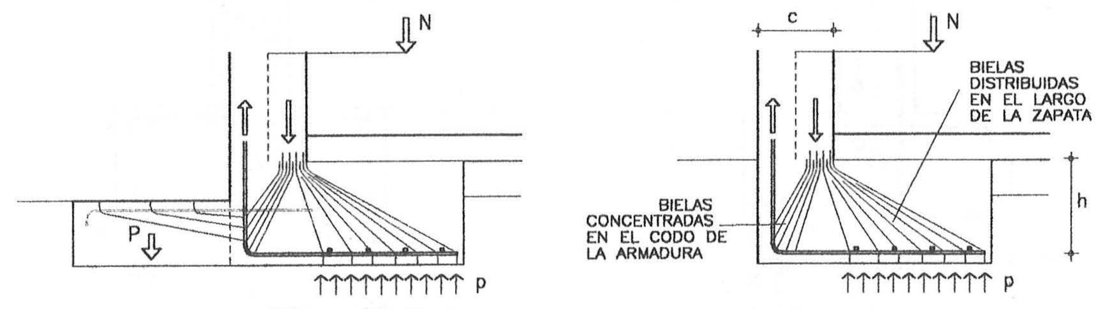


Figura 21. Opciones para carga muy excéntrica

La armadura transversal que demanda [2] en la dirección perpendicular a la excentricidad sólo se necesita en la zona en la que hay presión eficaz del terreno: un ancho 3·s, pero en la práctica se dispone en toda la superficie de la zapata.[3]

---

[1] Si se quiere más precisión, para decidir el canto mínimo y si la zapata puede ser en masa o debe ser armada, como presión para entrar en las tablas **1** y **2**, puede tomarse el promedio en todo el vuelo del lado cargado.

[2] Aunque eso no conduzca a la solución óptima, a partir de cualquier dimensionado inicial, basta aumentar el canto **h** y con él el peso de la zapata, hasta que se cumpla la condición [11].

[3] Las soluciones de la figura **21** son poco usuales; lo más frecuente es que las limitaciones de canto o de existencia de zapata se den hacia el lado de la excentricidad. La segunda, descentrada, se estudia más adelante.

En los casos anteriores, el recurso del peso propio mitiga algo la excentricidad. Si la trayectoria de carga cae fuera de la zapata, ese recurso es decisivo para conseguir reconducir la resultante al terreno con una zapata de tamaño controlado. Este problema se da con frecuencia en zapatas de nave con cubierta ligera, resuelta con pórtico de nudos rígidos, en los que la excentricidad del soporte, **M/N**, es del orden de **L/12**, o los sombrajos, o los cimientos de báculos de gran porte, poco pesados, pero sometidos a importantes acciones horizontales.[1]

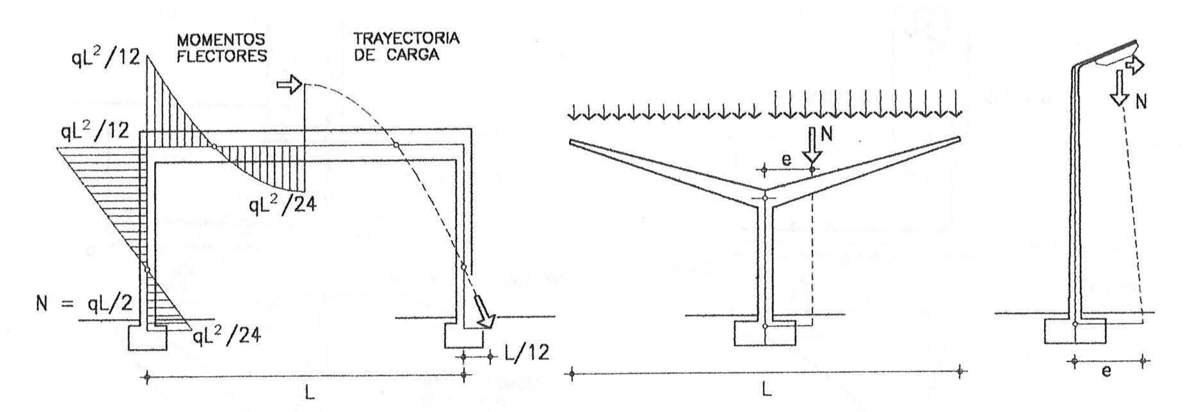


Figura 22. Soportes con gran excentricidad

En estos ejemplos, más que como un elemento que reparte las cargas en el suelo, la zapata se comporta como un *contrapeso*, que permite la estabilidad[2] del elemento liviano que tiene encima, y que puede estar sometido a compresiones muy excéntricas. Obviamente, en estos problemas, el dimensionado de la zapata debe ineludiblemente hacerse por tanteos, ya que la mayor parte de la solicitación procede de su propio peso, desconocido antes de dimensionarla. Por lo demás, el cálculo y la disposición de la armadura son las mismas que las indicadas para el caso anterior. Un problema típico en algunos de los ejemplos mencionados, es que el momento del soporte puede tener signo alternante. En ese caso, la disposición de la armadura debe atender a la superposición de los dos casos de carga, como muestra la figura **23**.

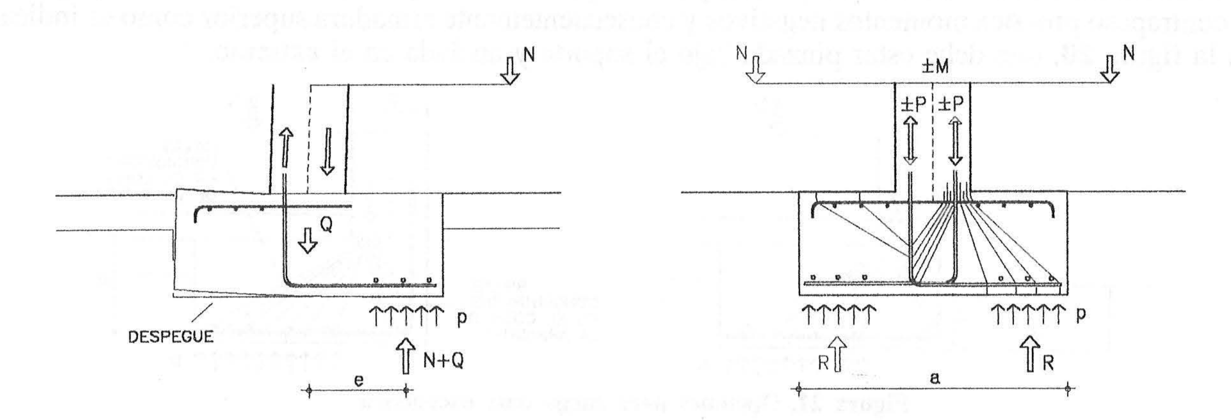


Figura 23. Cuando la trayectoria de carga cae fuera de la zapata

---

[1] En los dos últimos ejemplos, el momento es ineludible, fruto del equilibrio, y la zapata *debe* ser proyectada para dar cuenta de él; si, considerando el peso, la resultante cae fuera de la zapata, no hay equilibrio posible, y se dice que *vuelca*. En el primer ejemplo, la solicitación de momento procede de la compatibilidad, y no es imprescindible para el equilibrio, por lo que no vuelca; cuando eso parezca, el momento debe obtenerse de un modelo distinto, por ejemplo, con soportes articulados en el borde de la zapata.

[2] En construcciones sustentadas en una sola zapata, el hecho de que la trayectoria de carga pase justamente por el borde de la misma, es lo que define la frontera entre estabilidad e inestabilidad. Si se desea seguridad a vuelco debe comprobarse que aun si aumentaran las acciones desestabilizantes, la trayectoria no se saldría de la zapata. Un coeficiente de 1,5 en la seguridad a vuelco se traduce en comprobar que **e** < **a**/3, o sea que sólo se despega la mitad de la zapata.

2.1.3 Excentricidad en las dos direcciones

Las dimensiones y armado de la zapata deben cubrir las solicitaciones de todos los casos de carga que haya que considerar en el análisis de la estructura. En general la de cada uno es una compresión excéntrica distinta, y más aún, con excentricidad simultáneamente en las dos direcciones.[1] En ese caso, la expresión [8] se generaliza a $\mathbf{N/ab \pm M_a/0{,}17a^2b \pm M_b/0{,}17ab^2}$ que conduce a los de las cuatro esquinas, cuyo máximo —sumando las tres componentes— debe ser inferior a 1,25 veces **p**, la presión soportable.

Denominando $\mathbf{e_a = M_a/N}$ y $\mathbf{e_b = M_b/N}$, cuando $\mathbf{e_a > a/6}$ o cuando $\mathbf{e_b > b/6}$, la expresión anterior predice tracciones en un borde, por lo que deja de ser válida. Con excentricidad esviada, un vértice entra en tracción si la carga se sale del *rombo* con semiejes como los anotados, que se conoce como *núcleo central de inercia* de la zapata. Si la carga sea sale del núcleo central, y como se hacía en [10], la expresión de comprobación más sencilla es $\mathbf{N/2s2t < p}$, que resulta incluso una aceptable aproximación al caso en que caiga dentro. El cálculo de la armadura, necesidad de patilla, y anclaje del soporte debe hacerse por separado para cada dirección, a partir de la excentricidad que exista en ella, de acuerdo con las conclusiones de apartados anteriores.

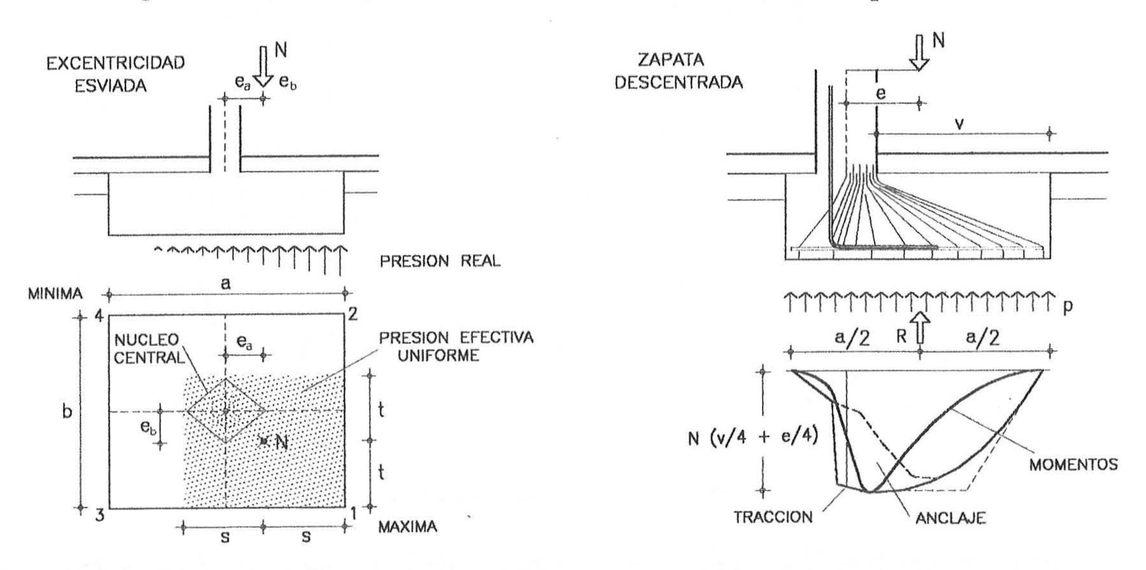


Figura 24. Excentricidad en las dos direcciones y zapata descentrada del soporte

En soportes de edificios, y salvo acciones sísmicas violentas, la excentricidad en ambas direcciones suele ser despreciable a efectos del cálculo de las zapatas. En cualquier caso, si existiera una excentricidad esviada dominante, no hay que descartar la posibilidad de reorientar la zapata según ella, volviendo al caso de compresión simplemente excéntrica.

2.1.4 Zapatas descentradas

Si el soporte está sometido a una compresión excéntrica sistemática o dominante, cabe disponer la zapata centrada con la posición de la carga, resultando una zapata descentrada respecto al pilar. Si éste debe soportar varias combinaciones de carga, se podría igualmente disponer la zapata centrada con la posición más probable o menos distante de todas.[2] La figura **24** muestra una zapata de ese tipo, que puede interpretarse como una variante de la de la figura **19**. En particular, para el cálculo de la armadura, según [9], el momento no puede superar $\mathbf{N \cdot (v/4 + e/4)}$.

---

[1] Nótese que son las direcciones de los lados de la zapata, que no tienen porqué coincidir con las dos direcciones que se han usado para el análisis del soporte.

[2] Precisamente porque en general las excentricidades tienen signo alternativo de unos casos de carga a otros, es por lo que la mayoría de las zapatas en las que es posible, acaban siendo centradas con el soporte.

2.2 ZAPATAS DE MEDIANERÍA

En obras de arquitectura de zonas urbanas, con ordenanza de manzana cerrada, es muy frecuente la existencia de soportes pegados a linderos, que obviamente deben cimentarse sobre zapatas dispuestas de manera excéntrica. El problema, que afecta también a las fachadas, se conoce comúnmente como el de *zapatas de medianería*.[1]

Hace algunas décadas, el proyectista se limitaba a disponer, aunque fuera de manera excéntrica, una zapata de planta suficiente, a tenor de la compresión del soporte; como en otros problemas, el resto del diseño proveía lo que faltaba para el equilibrio. En aquellos tiempos, las zapatas solían resolverse con un pozo más bien profundo, rematado en un cuerpo troncopiramidal, de hormigón en masa. En la actualidad la solución usual es una zapata armada de canto mucho menor, en la que no es posible dejar de hacer un planteamiento explícito del equilibrio.

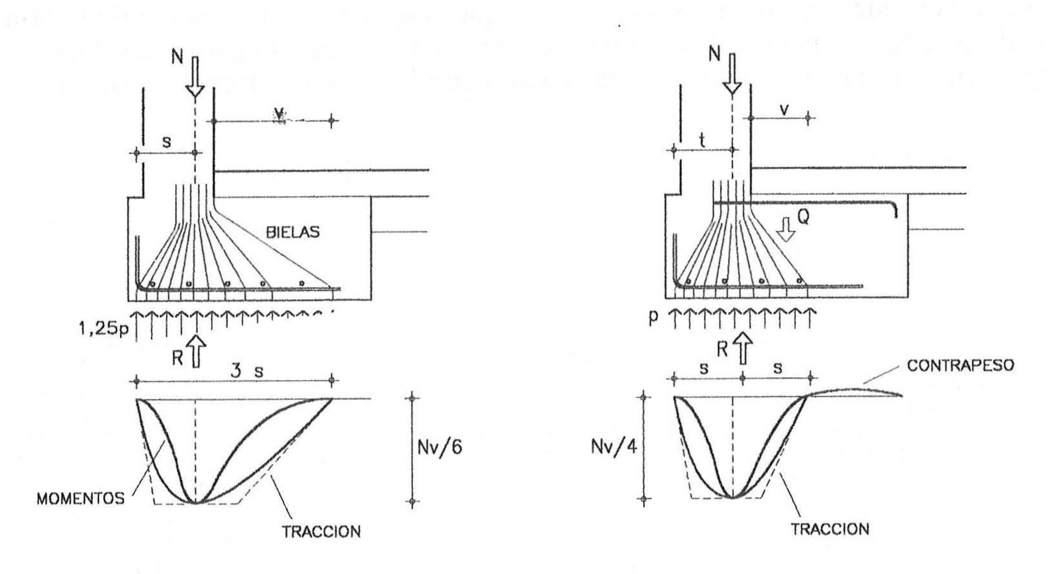


Figura 25. Zapata de medianería

Si la compresión **N** se sitúa a una distancia **s** de la medianería,[2] (figura **25**), la reacción del suelo debe dar cuenta de ella; considerando una ley triangular con una presión punta de hasta 1,25 veces la soportable, se puede validar la zapata con la [10], es decir por equilibrio con una presión uniforme cobaricéntrica, de valor **p**, siempre que el ancho total, **a** sea al menos 3·**s**.

Si la compresión está cerca de la medianería, **s** es pequeño, por lo que la [10] da lugar a zapatas con una longitud, **b**, desaforadamente grande. Como ese largo demanda un canto proporcional, la solución resulta muy cara.[3] Si la zapata es grande, se puede aprovechar su peso para distanciar algo más la resultante de la medianería. En rigor, para usar la [10] debe tenerse en cuenta que la distancia a la medianería no es la de la compresión del soporte, **t**, sino la de la resultante entre ésta y el peso de la zapata, o sea, análogamente a la [11]:

$$\mathbf{s} = (\mathbf{N} \cdot \mathbf{t} + \mathbf{Q} \cdot \mathbf{a}/2) \, / \, (\mathbf{N} + \mathbf{Q}) \qquad [\,12\,]$$

---

[1] El problema es específico de obras de arquitectura; la norma de hormigón, pensada más bien para obra civil, no le dedica ni una sola línea en el apartado de cimentaciones. La descripción del artículo 59.5, *"elementos lineales que pueden utilizarse para resistir excentricidades de construcción o momentos en cabeza de pilotes"* no parece referirse a las vigas centradoras, típicas de este problema, pero en cualquier caso, no desarrolla tampoco ninguna cláusula, dibujo, fórmula, o regla específica para esos elementos.

[2] En rigor, debido a que, como se verá, en ese borde hay tracciones, la distancia debe medirse no a la cara de hormigón de la zapata, sino al eje de la armadura vertical pegada a esa cara.

[3] Cuando por otro motivo, como en el caso de paredes de sótano, haya disponible una gran longitud, el cimiento de medianería puede resolverse con una gran eficacia, sin necesidad de acudir a viga centradora alguna.

Se puede dotar a la zapata de un ancho mayor del estrictamente indispensable,[1] 2,2·s, sacando partido al efecto de contrapeso, pero la ventaja[2] es muy pequeña y no suele ser rentable. La figura **25** muestra la ley de momentos, la tensión en la armadura, la organización del armado y la distribución de bielas de este problema. Por analogía con las zapatas centradas, con un canto de al menos la mitad del vuelo no será preciso disponer estribos, pero no es recomendable resolverla en masa. Debido a la mayor pendiente de la tensión en el borde medianero, resulta conveniente rematar ese extremo en escuadra para la longitud total de anclaje; en el extremo interior, la regla puede regirse por la [6]. Esta solución, conocida como zapata *autocentrada*, no es eficaz salvo para cargas diminutas, dos o tres plantas a lo sumo.

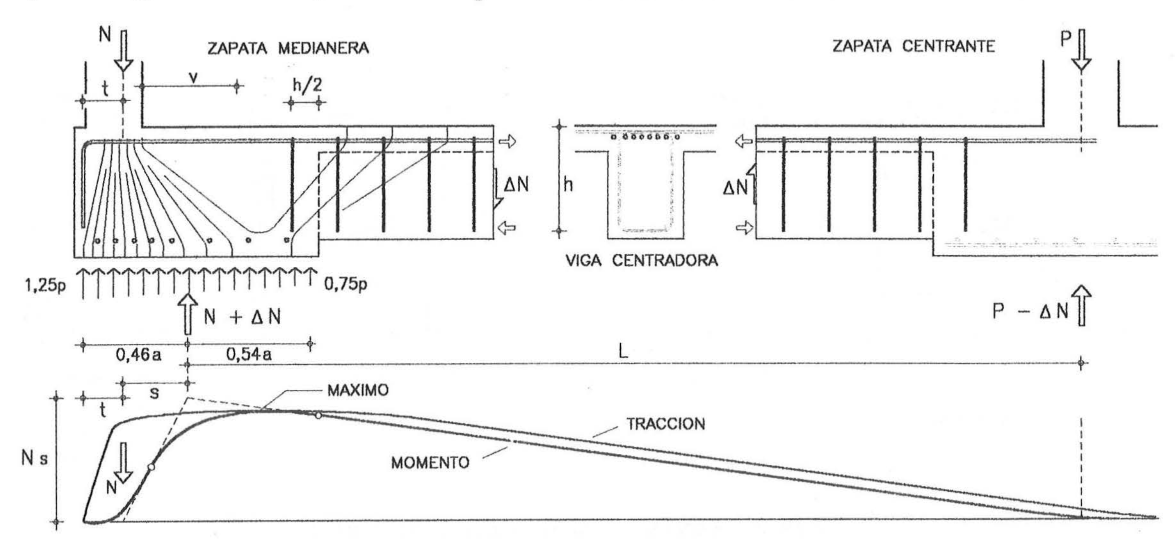


Figura 26. Zapata de medianería con viga centradora

La solución más clásica para centrar la carga es aprovechar como contrapeso una que ya exista en las inmediaciones, tal como la del soporte más próximo.[3] La solución se conoce como de *viga centradora*. El soporte interior, (véase figura **26**) con compresión **P**, descarga en su zapata una parte **P–ΔN**, mientras el de medianería descarga en la suya el resto, N+ΔN, siendo:

$$\Delta N = N \cdot s / L \qquad [13]$$

pudiéndose comprobar las dimensiones de la zapata medianera con la [1]. Hay que proceder por tanteos. El pequeño incremento de **N** perjudica levemente la zapata medianera, pero a cambio se obtiene fácilmente un gran desplazamiento de la carga. El coste de este sistema radica en la viga que transfiere la carga **ΔN** de una a otra.[4] Puesto que tanto el incremento de carga como el momento máximo de la viga dependen, modularmente, de **N·s**, el objetivo será reducir en lo posible el *desvío* **s**, minimizando el coste del conjunto. El problema no tiene una solución única.

---

[1] El valor, ligeramente superior al de 2·s que aparece en [10], proviene del afine de considerar una respuesta trapecial con 1,25·**p** en el borde exterior y 0,75·**p** en el interior.

[2] Aunque las conclusiones no son extrapolables linealmente a otras cargas, un soporte con 700 kN de compresión simple, en un suelo que admite 250 kN/m², se puede solucionar con una zapata centrada de 1,70×1,70x045 m en total, con apenas 1,3 m³ de hormigón, y como indica la tabla **3**, con no más de 30 kg de acero, cuyo coste, sin contar excavación, sería de unas 17.000 Pta (100 euros). Si la zapata es de medianería, con un soporte de 0,30 m de lado, la carga se situaría a 0,15 m de la linde, exigiendo, según [12] una zapata de 8,00 m de largo y 0,35 m de ancho; eso apunta a 2,0 m de canto. Aun esa gigantesca zapata sólo pesa 140 kN, lo que significa que, según [12] la carga apenas se centra 0,01 m. La solución, con al menos 6 m³ de hormigón, 60.000 Pta (350 euros), es disparatada.

[3] No tiene porqué ser directamente de un soporte. Puede ser de otra viga, que a su vez hace de puente entre dos soportes, recogiendo carga de ambos.

[4] Eso no es lo esencial. Como se verá más adelante, dos zapatas excéntricas pueden centrarse entre sí a través de viga sin transferirse carga. Lo crucial de la viga centradora es que aporta el momento **N·s** para el centrado de la carga.

Con los significados de la figura **26**, puesto que debe ser **R/ab** < **p**, siendo **R**= N+ΔN, teniendo en cuenta [13], y que la mayor capacidad a menos distancia del borde se produce con una distribución 1,25·**p** .. 0,75·**p**, resulta **a** = 2,2·(s+t), de donde el dimensionado se hace con:

$$N \cdot (1 + (0{,}46 \cdot a - t)/L) \;/\; a \cdot b \;<\; p \qquad [14]$$

La variable crucial es **t**, es decir a qué distancia del borde se encuentra la compresión del soporte, cuestión que depende sobremanera del modelo usado en el análisis de la estructura,[1] siendo ideal que incluya la zapata.[2]

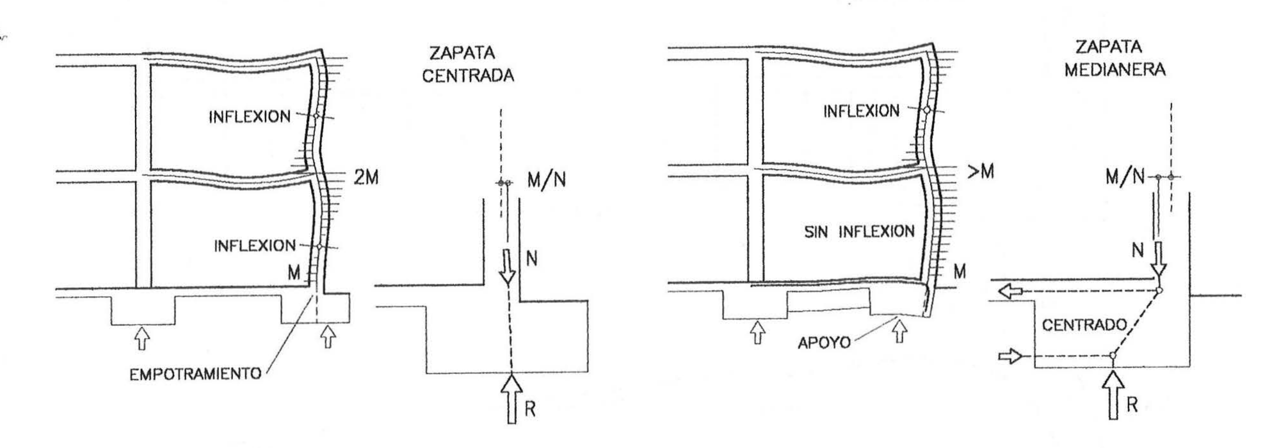


Figura 27. Excentricidad de soporte medianero

Para proceder a situar con tino N, antes de dimensionar la zapata y la viga centradora, una solución es proceder por *capacidad*, Con ese sistema, si el soporte, de sección constante, va a ser capaz en cabeza de soportar un momento **M**, puede hacerlo en el pie, partiendo pues de momento constante,[3] con una distancia **t** muy favorable. Es más, si el soporte tiene sección desahogada,

---

[1] Suponer que la compresión del soporte es centrada es demasiado trivial, aunque algunos autores es lo que propugnan. Lo que abunda es simular la zapata como un empotramiento para el soporte. Con ello, dado que el nudo superior del soporte puede girar, véase figura **27**, el momento en base tiende a ser de signo opuesto al de piso, —típicamente de valor mitad—, como corresponde a una deformación con un punto de inflexión, desplazando el diagrama de compresiones hacia *afuera,* reduciendo **t**, y por tanto agravando, a veces muy notablemente, el problema de la viga de centrado. Nada más lejos de la realidad. Es al revés. Puesto que la zapata se apoya en el terreno en el punto de aplicación de **R**, y la viga centradora tiene tracciones por arriba, su incurvación no puede menos que provocar giro en el extremo donde se ubica el soporte, que resulta ser de signo opuesto al del piso. Cabe pues esperar que la deformación del soporte tenga curvatura de signo constante, sin inflexión, desplazando las compresiones hacia *adentro,* aumentando **t** y aliviando el problema de centrado. Si el soporte se sustenta en zapata centrada, su unión a ésta puede modelarse como empotramiento. Si la zapata es excéntrica, no. El modelo de análisis de la estructura debe considerar el conjunto de soporte y zapata *apoyado* en el punto de aplicación de **R**.

[2] Eso implica dimensionar la zapata antes de analizar la estructura. No debía extrañar ese proceder. En hormigón es usual dimensionar las secciones de hormigón antes del análisis, que depende de la rigidez, y en sentido estricto tal magnitud depende de la armadura. En acero laminado siempre hay que dimensionar antes de analizar. Lo que se denomina análisis suele ser más bien un método de comprobación, que exige partir del previo conocimiento completo de la solución que se pone a prueba. El problema es pues, como tantos otros, un círculo vicioso, que exige proceder por tanteos. El calculista de cimientos suele ser reacio a todo lo que no sea pedir las solicitaciones de la estructura, para posteriormente resolver la cimentación, sin percatarse de que en muchos casos lo segundo altera notablemente lo primero, y las solicitaciones de la estructura pueden depender fuertemente del dimensionado de los cimientos.

[3] En la situación de empotramiento, el momento al pie es de signo contrario y de valor mitad. Si se supusiera articulación, el momento sería nulo. Algunos programas, conscientes de la necesidad de aumentar **t** todo lo que se pueda, permiten manipular el *grado de empotramiento elástico* del soporte en su base, desde 1, empotramiento perfecto, a 0, articulación. Lo más favorable es siempre articulación. Por lo que aquí se deduce, el valor de esa variable debería ser negativo, y podría llegar a –2. Lamentablemente el método de resolución programado no admite valores negativos, por lo que ese recurso no es capaz de simular acertadamente las condiciones de enlace del soporte a la zapata.

o, en hormigón, armadura mayor de la estricta, o ancho algo generoso, se puede obtener **t** como la *máxima* posición de **N** que sería soportable a tenor de la sección y capacidad real dispuesta. Eso aumenta aún más **t**, reduciendo sensiblemente la armadura de la viga centradora. Si el momento real de la viga fuera mayor del que ha supuesto para armarla, la viga perdería rigidez, girando, hasta que la carga del soporte se desplazara hasta donde el momento fuera soportable. El sistema se corrige pues por sí sólo, modificando las solicitaciones al valor que se suponga.

Una zapata de medianería con viga puede verse como la mitad de una zapata centrada, lo que significa que la armadura inferior se determina pues con la [3], tomando para **N** el doble de la compresión del soporte medianero, y que lo recomendable es que **a** = **b**/2. La diferencia de la zapata medianera con media zapata centrada es que el equilibrio procede del lado opuesto. En vez de una compresión superior localizada en la acometida del soporte, hay una tracción en la cara opuesta, que exige una armadura que llegue hasta detrás del soporte y haga quebrar su compresión. En la base de la zapata, en vez de una tracción, lo que hay es una compresión en la cara opuesta. Para que haya equilibrio, el canto de la viga centradora no debe ser mucho menor que el de la zapata a la que centra.

Lo peculiar ahora es que esa compresión inferior aparece localizada, cuando el equilibrio la necesita dispersa en todo el ancho de la zapata. Por un lado, que sea compresión mitiga las tracciones de las armaduras inferiores de la zapata, al menos en las directamente enfrentadas con la viga, pero a cambio, la necesidad de dispersar su efecto origina una tracción transversal, que aumenta[1] las necesidades de armadura inferior paralela a la medianería.[2] De las perpendiculares, las alejadas de la viga conviene rematarlas del lado medianero en escuadra, con toda su longitud de anclaje, como se indica en la figura **24**; para las intermedias puede bastar una patilla, y las situadas bajo la viga incluso sobran.[3] Las armaduras superiores de la viga deben anclarse tras pasar bajo el soporte.[4] La viga debe comprobarse además[5] para un cortante igual a ΔN.

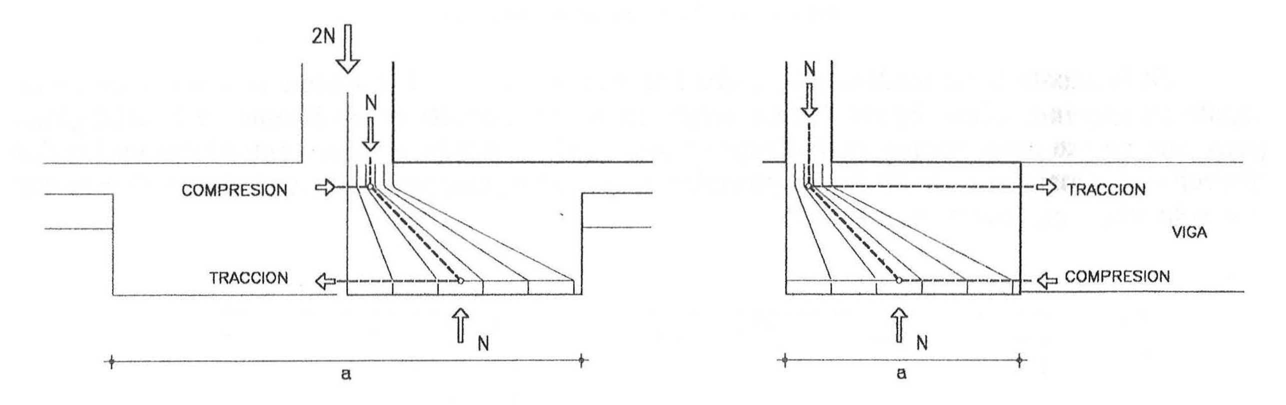


Figura 28. Zapata centrada contra zapata de medianería

[1] La reducción de armadura inferior enfrente de la viga debida al exceso de compresión aportado por ella en ese punto, suele despreciarse.

[2] Debido a que la compresión de la viga es **N·a/2z** y que la tracción que provoca es **T** = **C·b/4·a** resulta un valor **T** = **N·b/8·z**, es decir una *duplicación* de la armadura en la dirección de **b**.

[3] El patrón completo de tracciones, proveniente de la acometida del momento de la viga, que es flector para ella, puede verse como *torsor* para las demás secciones. No otra cosa es la emigración de las tracciones al pasar de la banda central a las extremas. Verlo como torsor es lo que explica que algunos autores propongan como armado de la zapata de medianería una jaula completa, tal como corresponde a ese tipo de solicitación. En realidad, dado que largo ancho y canto de la zapata son de un orden de magnitud similar, nada obliga a interpretar el problema en clave de pieza lineal paralela a la medianería, armando con los tópicos de piezas sometidas a torsión.

[4] Alternativamente pueden unirse las armaduras dos a dos, en *lazo* alrededor del soporte, obviando el anclaje, siempre que la compresión del soporte supere la suma de tracciones de las armaduras enlazadas bajo él.

[5] La sección de viga que permite una armadura razonable suele dotarla de rigidez suficiente para impedir un giro excesivo del funcionamiento del conjunto. Para aumentar la eficacia de la viga y reducir la incidencia de su deformación, conviene embeberla con la solera.

Si la viga centradora no es perpendicular a la medianería, las variables anteriores deben interpretarse según se indica en la figura **29**, en la que se muestra además la posibilidad de diseñar la zapata medianera con planta triangular y el caso de dos zapatas de medianería próximas, centradas entre sí con una viga centradora, sometida a flexión constante.

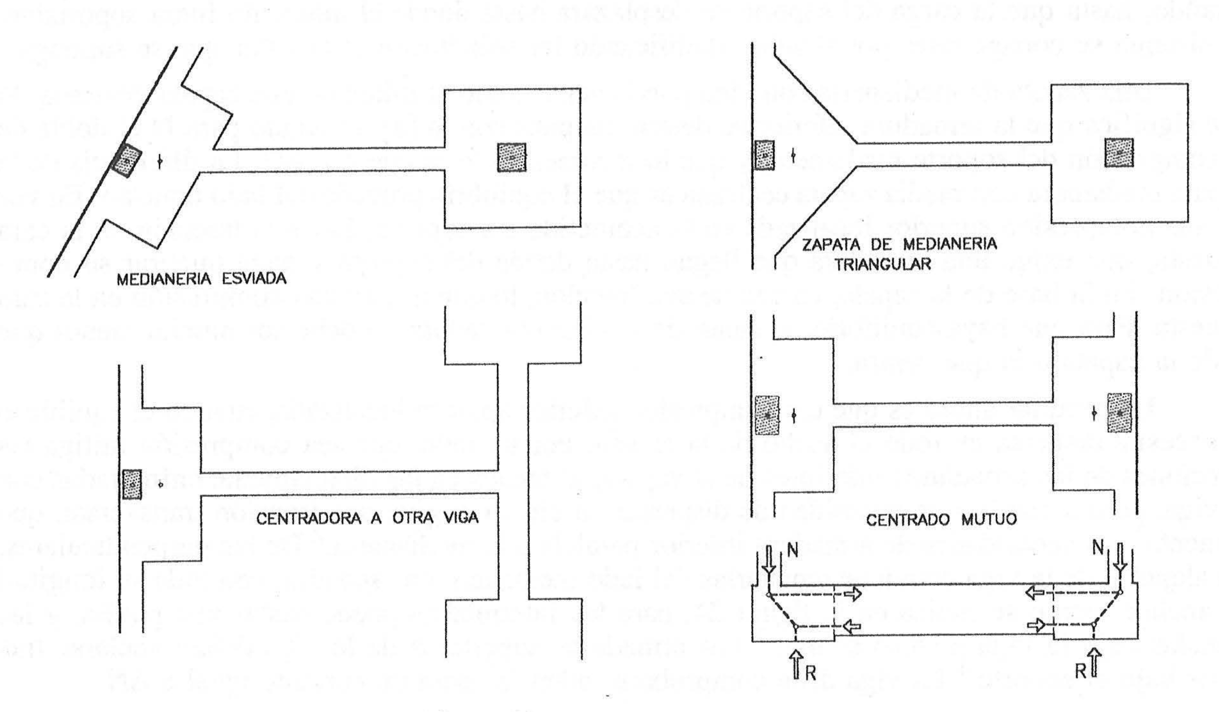


Figura 29. Zapatas de medianería

Si la zapata tiene medianería en dos bordes adyacentes, el problema se conoce como de zapata en *esquina*, véase figura **30**. La mejor zapata en esquina es posiblemente la triangular, pero, aun en ese caso, resulta casi siempre imprescindible acudir a vigas centradoras en las dos direcciones, superponiendo las reglas precedentes en ambas, aunque puede también resolverse con una sola viga centradora diagonal.

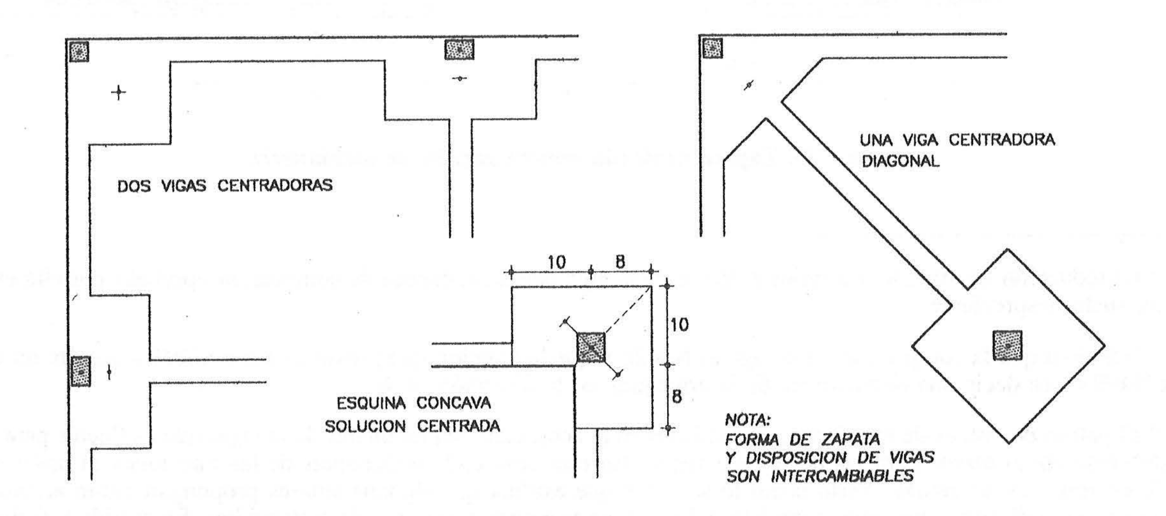


Figura 30. Zapatas de esquina

Si el soporte se encuentra en el vértice cóncavo de una parcela, la necesidad de centrado puede ser muy reducida, y puede eliminarse por completo, disponiendo el soporte en el centro de la zapata con forma de tres cuartos de rectángulo, debiendo procederse al cálculo de la armadura por cortes análogos a los de casos anteriores.

2.3 ZAPATAS COMPUESTAS

Aunque sea lo más usual, no es obligado que cada soporte tenga su zapata y cada zapata sólo sirva para un soporte. En edificación es relativamente frecuente que, al proyectar una zapata para cada soporte, éstas interfieran entre sí.[1] Los casos más simples son los de soportes gemelos, con la misma carga y sección. Si al dimensionar sus zapatas como cuadradas, sus plantas se solapan, véase figura **31**, se puede cambiar su planta a rectangular, de manera que, manteniéndose centradas, queden justamente adosadas, o ampliar el perímetro envolvente inicial hasta que el conjunto tenga una planta como la suma de lo que demanda cada soporte, lo que necesariamente lleva a un vuelo mayor que el inicialmente previsto.

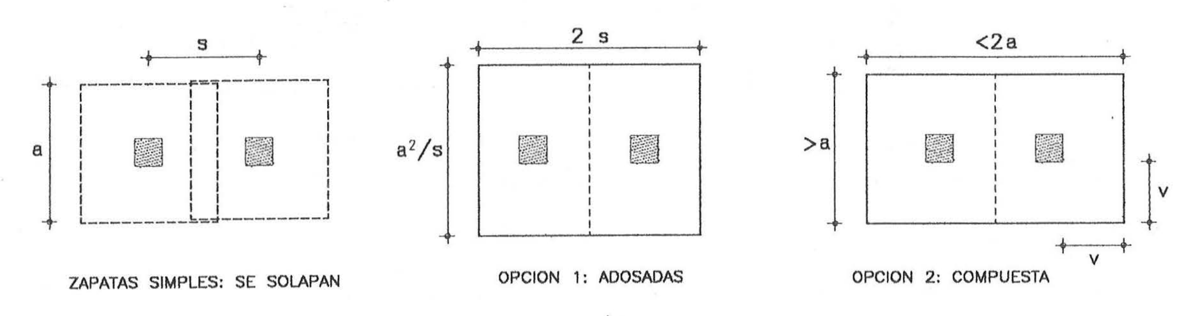


Figura 31. Soportes próximos

Denominando s el desplazamiento del centro de cada planta tributaria de la vertical del soporte, del lado del vuelo de la zapata, la sección media, C, está sometida a tracción inferior, la procedente de un momento:

$$M_c = N \cdot s \qquad [15]$$

por lo que si la zapata debe ser armada, necesita armadura inferior corrida, en el exterior en función del vuelo, según [3], y entre soportes, según [15].

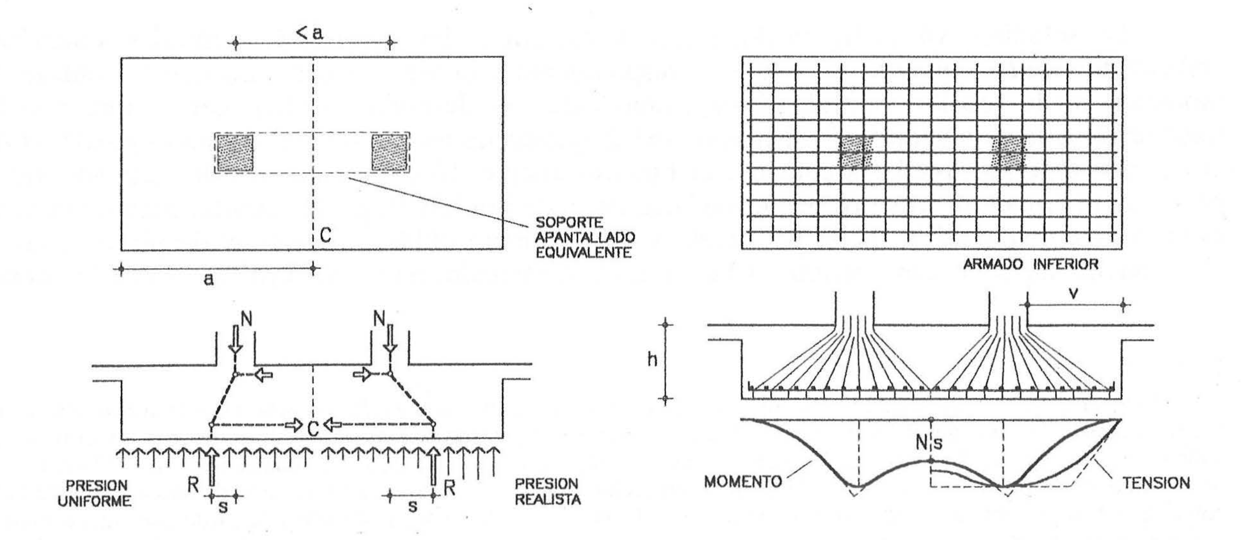


Figura 32. Armado de zapata para dos soportes próximos

[1] En cuanto la distribución de zapatas no es absolutamente uniforme, la superposición de los *bulbos* de presiones del lado de las más próximas, produce una asimetría de asiento de cada una, produciéndose giros conjugados entre ellas, que alteran el diagrama de presiones bajo cada zapata, tendiendo cada pareja al comportamiento de una zapata única *combinada* y obligando al trabajo de la losa de suelo para mitigarlo, fenómeno que se estudia más adelante. Este efecto es tanto más acusado cuanto más próximas están las zapatas, y sucede aun mucho antes de interferir físicamente con sus volúmenes de hormigón, que es a lo que se refiere específicamente el texto.

La figura **32** presenta el diagrama de bielas,[1] momentos flectores y tracciones[2] de este caso. Evidentemente la zapata debe tener armadura si la relación **v/h** supera los valores de la tabla **1** y, aun armada, no debe tener un canto inferior al que se indica en la tabla **2**. Por motivos prácticos la armadura inferior longitudinal se dispone uniforme de lado a lado, en parrilla corrida, rematada en patilla, si [6] lo sugiere.

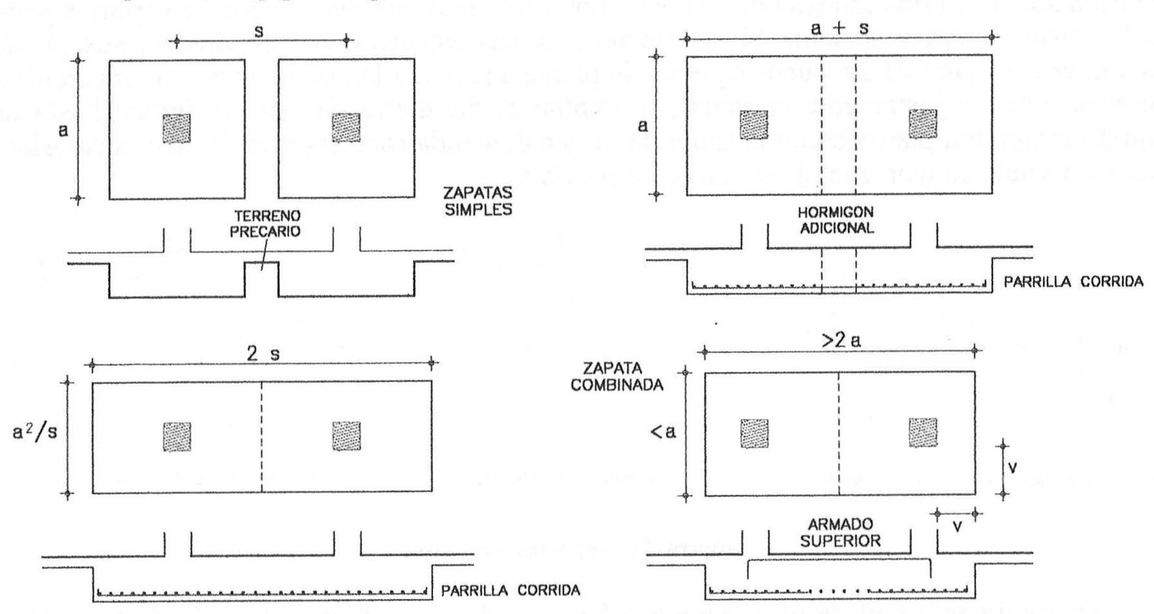


Figura 33. Opciones con zapatas próximas

Cabe también el problema inverso. Si las plantas de las zapatas inicialmente proyectadas no se solapan, pero dejan entre ambas un murete de terreno precario, puede ser prudente eliminarlo, a) añadiendo hormigón, b) cambiando la planta de las zapatas a rectangular para que se toquen,[3] o c) lo que propiamente se denomina zapata *combinada*, desplazando las zapatas para que queden fundidas en un sólo volumen, esta vez con los soportes por fuera de los centros del área tributaria de cada una.

La solución, véase figura **34**, puede verse como dos zapatas descentradas simétricas, embebiendo entre ambas la armadura correspondiente a la viga de centrado que las enlaza. El momento de la sección central, **C**, es, como antes, el definido en [16], pero ahora con las tracciones en la cara superior.[4] El trazado del diagrama de momentos del conjunto puede, como en el caso anterior, ayudar a entender el funcionamiento. Si el descentrado de cada soporte es pequeño, la armadura superior puede anclarse antes de siquiera llegar al soporte, pero en general, es preferible llegar a él y anclar por pinzado, algo imprescindible en cuanto el desplazamiento es algo mayor, en cuyo caso incluso debe acudirse a escuadra hacia adentro de la zapata, siendo

[1] Debido a que la distribución real de presiones no es uniforme, tendiendo en general a concentrarse en los bordes, suponer la reacción **R** en el centro del área tributaria puede suponer un error relativo a **s** muy superior al que tenía respecto a **v** en la figura **6**, dando lugar a un armado algo inseguro. Por ello es prudente disponer **R** ligeramente desplazado hacia afuera, como indica la figura, corrección similar a la sugerida en el caso de soporte apantallado, con el que éste presenta algunos rasgos comunes. En el caso de zapatas justamente adosadas, esta corrección predice tracciones en la línea media, siendo conveniente incluso en ese caso, disponer una parrilla corrida para ambas.

[2] El conjunto puede verse como dos zapatas adosadas descentradas, que incluyen dentro de las mismas su viga centradora, en este caso, con compresiones superiores y tracciones inferiores.

[3] En la línea de notas anteriores, tanto si se tocan como si no, la interferencia de los bulbos provoca que la presión del terreno se concentre en los bordes externos del conjunto, lo que provoca solicitaciones adicionales, tales como las derivadas del giro conjugado de las zapatas, o acodalado a través de la solera, comportamientos que se analizan más adelante.

[4] El efecto citado, de concentración de presiones en los bordes, opera ahora en sentido contrario, dando lugar a menos tracción superior que la supuesta, obtenida a partir de presión uniforme.

recomendable disponer una armadura uniforme, preferiblemente en una estrecha banda de soporte a soporte.[1]

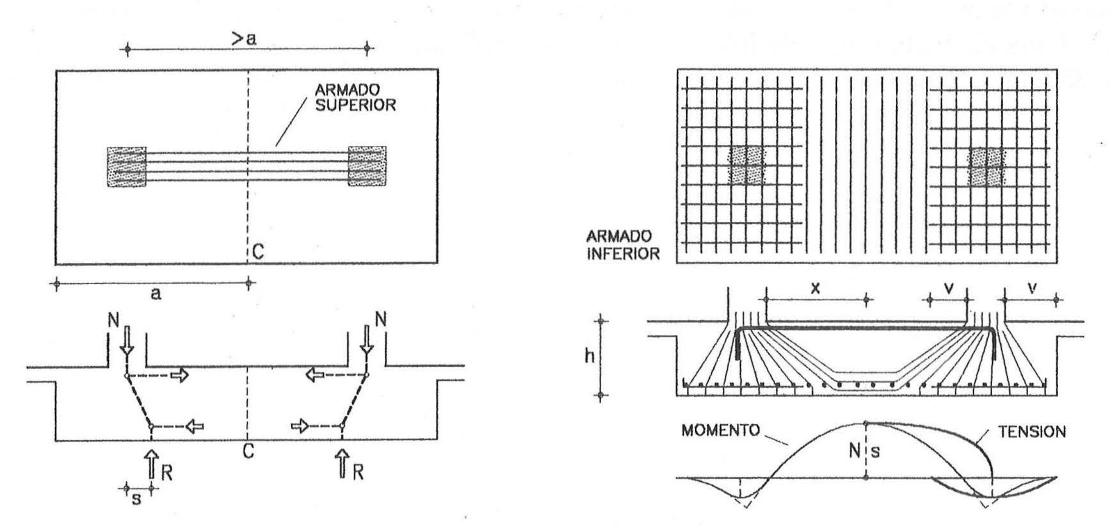


Figura 34. Armado de zapata combinada

La figura 35 muestra una gradación completa de las zapatas combinadas simétricas. Un caso límite es el de soportes al borde de la zapata,[2] en el que en la cara inferior sólo subsiste la armadura transversal; la longitudinal se sitúa en su totalidad en la cara superior, de soporte a soporte, debiendo poner un especial énfasis en su anclaje y enlace a los soportes.

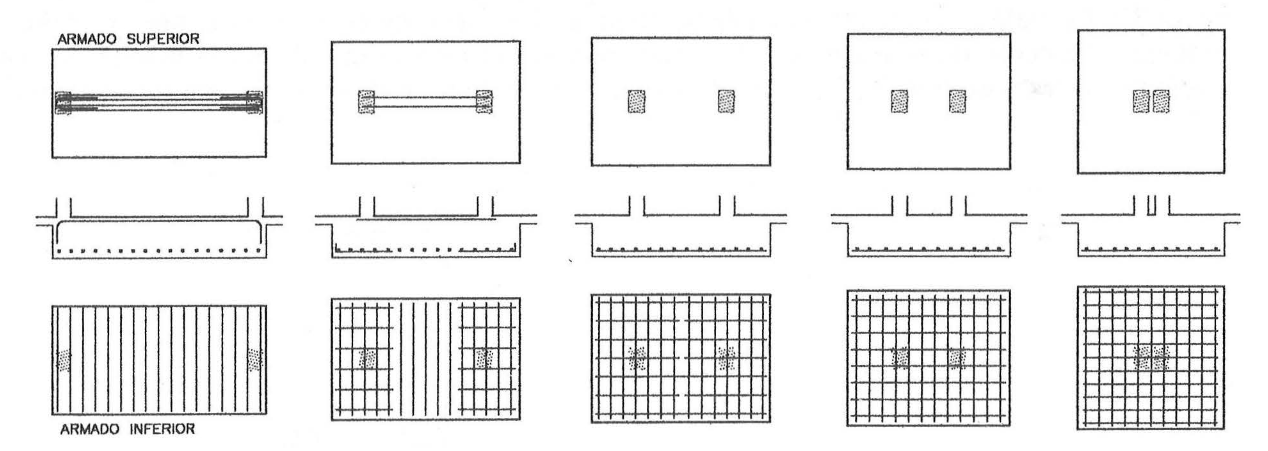


Figura 35. Tipos de zapata para dos soportes

En el otro extremo se sitúa la zapata para dos soportes prácticamente pegados, como es el caso de junta de dilatación,[3] indistinguible de una zapata para el soporte envolvente de ambos.[4]

---

[1] No es infrecuente, en detalles constructivos publicados, encontrar que esa armadura se proponga extendida a todo lo largo y ancho de la zapata, solución que puede comprobarse fácilmente que no conduce a equilibrio en las bielas. La solución, a nuestro juicio equivocada, está ampliamente difundida, y basta que dos zapatas acaben fundidas en un sólo volumen para que, sin distinguir siquiera de si trata de este caso o del anterior, que no tiene tracciones en esa cara, se prescriba armadura superior en cuadrícula que no tiene ningún papel ni justificación. Asimismo, mientras el canto de la zapata sea superior a la mitad de la luz neta entre soportes, huelga toda comprobación a cortante o la necesidad de estribos, que algunos autores propugnan como imprescindibles sin más en esta solución.

[2] Aunque no es habitual, cabe incluso que un soporte deba disponerse por fuera de la zapata, como es el caso de soportes de medianería, cuando ésta ha sido invadida por la construcción del colindante.

[3] En situaciones ordinarias no interesa disponer junta en la zapata. Por un lado eso exigiría centrado de las dos zapatas resultantes, que en su flexión se interferirían, anulando la pretendida independencia. Por otro lado, al estar embutidas en el terreno cabe dudar que pudieran participar en la dilatación o contracción de la estructura superior. El suelo bajo un edificio apenas tiene oscilaciones térmicas.

El lector podrá generalizar fácilmente la solución, mediante el trazado del diagrama de momentos, a los casos de zapata combinada con soportes de diferente compresión, o en posición asimétrica respecto a la zapata combinada, véase figura 36. Uno de los casos típicos de este problema es cuando uno de los soportes es de medianería, en el que debe cuidarse sobre todo el anclaje de la armadura superior de centrado, preferiblemente por solución en lazo bajo el mismo.

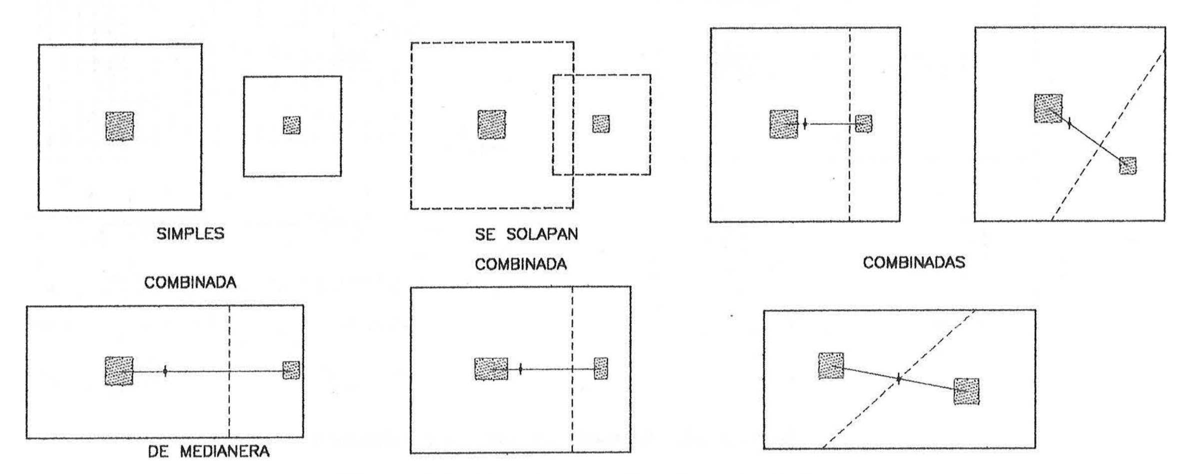


Figura 36. Zapatas combinadas asimétricas

Ni que decir tiene que cabe cualquier disposición, combinando los vistos hasta ahora, un caso en una dirección con otro cualquiera en la otra.[1] En particular, aunque no es frecuente, cabe la zapata combinada para más de dos soportes, por ejemplo de cuatro, como se muestra en la figura 37. En todos esos casos, el análisis, como en los precedentes o en otros que se pudieran plantear, el cálculo de la necesidad de armadura y en su caso el cálculo de la misma, se hace mediante cortes y equilibrio, bien de cortante o de momento, al modo de los ya presentados.[2]

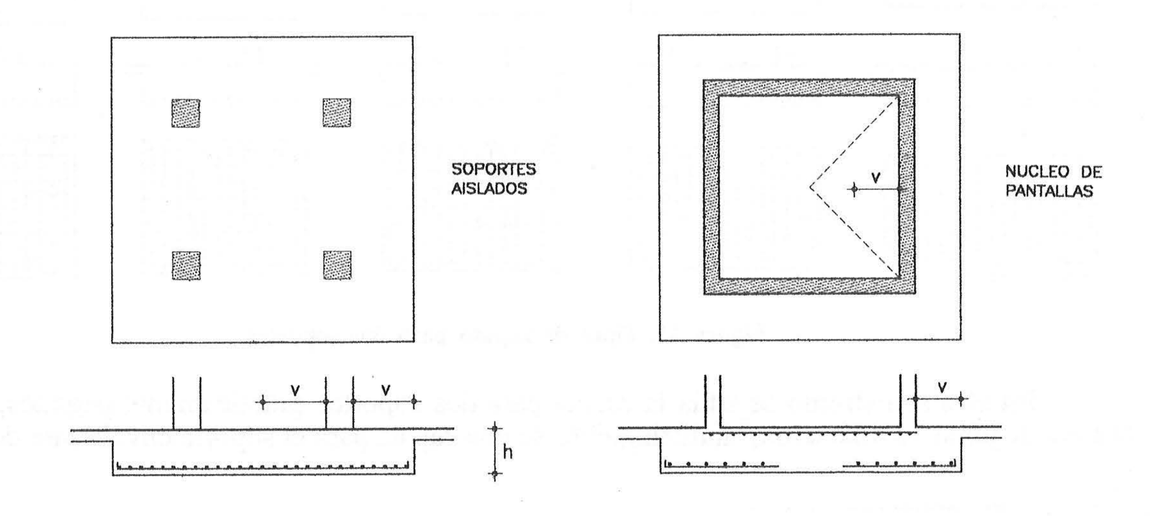


Figura 37. Zapatas combinadas para cuatro soportes

[4] Con objeto de evitar que el movimiento de dilatación de la estructura superior, o la interrupción repentina de la junta, provoque el rajado de la zapata, es buena práctica disponer una armadura de cosido en el entronque de los soportes a la zapata, con una capacidad a tracción del orden de la cuarta parte de la compresión de cada uno, anclada a ambos lados de la cara exterior de los mismos.

[1] En la figura 30 se veía el caso de la zapata en esquina, que no es sino el de centrado en ambas direcciones.

[2] La suposición de presión uniforme es generalmente segura si los soportes están desplazados hacia *afuera* de su área tributaria. Cuando están desplazados hacia *adentro*, es ligeramente insegura, matiz que, como se verá, puede quedar mitigado o incluso eliminado si existe solera que conecta con las demás zapatas.

Otro caso típico puede ser el de la zapata para núcleo rígido. La solución tiene muchos rasgos del equivalente de cuatro soportes locales en las esquinas del núcleo. Tales elementos se suelen disponen en edificios de altura respetable, más de doce o quince plantas, destinándose a soportar toda la acción horizontal, aunque lamentablemente no logran en general hacerse cargo de toda la vertical, de manera que la relación entre ambas se halla descompensada. Como a su vez, los forjados de piso tienen, respecto al núcleo, muy poca rigidez, no se logra restituir el punto de momento nulo en cada planta, de manera que el núcleo soporta la acción horizontal en ménsula de muchas plantas sucesivas.

El resultado es, para el conjunto del núcleo, un momento elevado respecto a la compresión; si la oblicuidad de la acción[1] es del orden de 2%, lo que con soportes en pórtico se traduce en excentricidades de pocos centímetros, la oblicuidad de la solicitación en el núcleo puede alcanzar fácilmente el 4% o el 6%, que produce excentricidades en la banda del metro. Debido a que el fracaso del núcleo significa el fallo de la construcción, el cálculo debe incluir la comprobación de estabilidad, adoptando como carga vertical sólo la fracción permanente y la totalidad de la acción horizontal, comprobando que el momento estabilizante supera con el margen de seguridad establecido[2] al desestabilizante.

Para la comprobación de resistencia, la condición pésima procede de considerar toda la carga vertical, limitando la presión en el borde de sotavento a 1,25·**p**. Es buena práctica que a barlovento subsistan presiones, aunque sean reducidas, para que la zapata no pierda adherencia con el terreno en ninguno de sus puntos, sea cual fuere la dirección de la acción horizontal.[3]

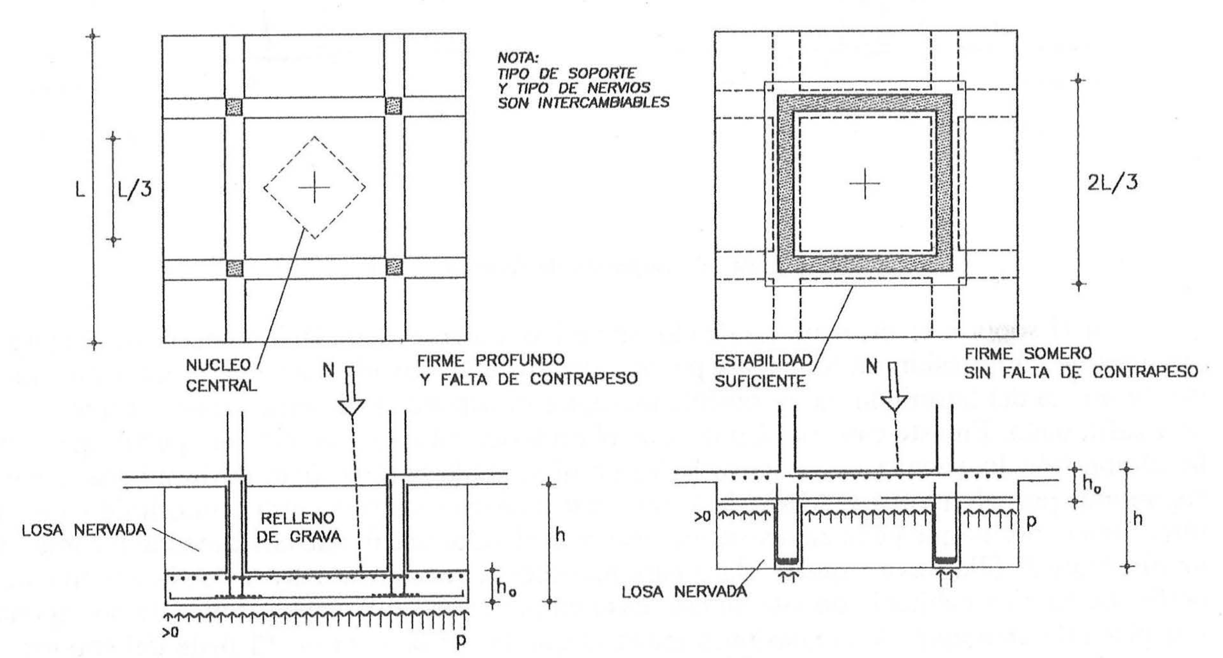


Figura 38. Zapatas de núcleos

En estos casos es frecuente que haya que profundizar más de lo habitual, buscando un firme de mayor capacidad portante, o para incorporar peso estabilizante. La figura **38** muestra dos soluciones, disponiendo nervios prolongados al exterior del núcleo, al modo y manera de las soluciones de placas base de soportes metálicos, o formando un vaso que posteriormente se rellena de material inerte, tal como grava, mucho más barata que hormigón, sin los inconvenientes de retracción que tendría un volumen de esas proporciones.

---

[1] Los valores se refieren a la acción de viento típica en nuestras latitudes. La acción de sismo, que puede ser de un orden de magnitud superior, en la banda del 10% o más, queda fuera del alcance de este apartado.

[2] Como se indicó antes para una zapata simple, para conseguir una seguridad a vuelco de 1,5 la trayectoria de carga no debe acometer al terreno con una excentricidad superior a **L/3**.

[3] Eso equivale a que la trayectoria no se salga del *núcleo central de inercia*.

2.4 ENLACE DE SOPORTES A ZAPATAS

Al margen de las tensiones, y en su caso, armaduras, derivadas de la propia flexión de la zapata, el enlace del soporte a la misma puede originar estados de tensión que exijan comprobaciones, detalles específicos de disposición de armaduras, o incluso armaduras adicionales, tal como las que se han insinuado ya en algunos de los casos analizados.

Si el soporte es de fábrica, por ejemplo, de ladrillo, su comprobación consiste en constatar que está sometido, en una zona parcial junto al borde más acortado, a una tensión de compresión soportable, véase figura **39**. Como en general la resistencia de la fábrica es mucho menor que la que del hormigón de la zapata, éste es sobradamente seguro. La acción horizontal, o cortante del soporte, si existe, se traduce por lo habitual en una oblicuidad leve de la compresión que, si es soportable por los tendeles entre hiladas de la fábrica, también lo podrá ser entre fábrica y zapata. La solución de enlace de soporte a zapata consiste pues simplemente en la *presentación* de la fábrica sobre el hormigón.

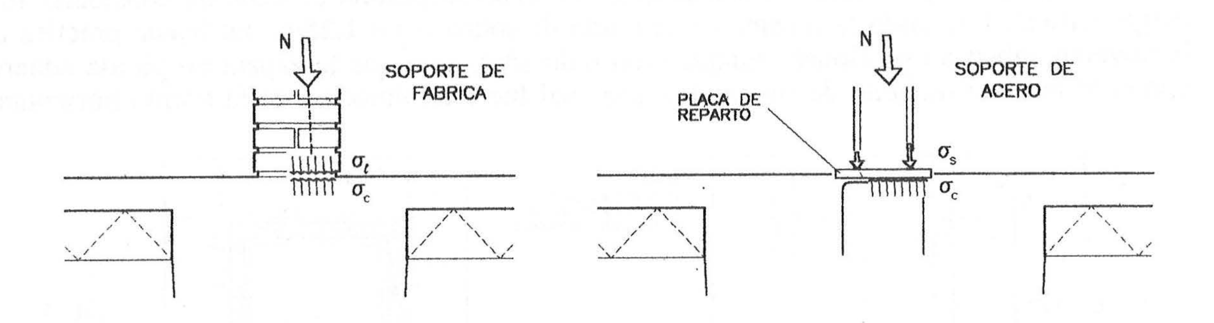


Figura 39. Soportes de fábrica y acero

Si el soporte es de acero laminado, sometido a una solicitación de compresión simple, o que origina compresión en todos sus puntos, debido a la elevada resistencia del acero, mucho mayor que la del hormigón, no es posible presentar directamente el perfil sobre la zapata sin que ésta sufra daño. En este caso se dispone una placa *base*, soldada a la testa del perfil, que reparte la compresión localizada de las chapas del perfil en toda la superficie de la misma a tensión soportable por el hormigón. Bajo la placa, este material se encuentra comprimido en todas direcciones, por lo que gana en resistencia respecto al valor usual, que corresponde a compresión unidireccional. Ello lleva a que la placa base no necesite ser mucho mayor que la envolvente del perfil. La técnica habitual consiste en este caso en presentar en la zapata, antes de homigonarla, una placa de *arranque*, de dimensiones mayores que las de la anterior. El fuste del soporte, con su placa base incorporada, se suelda, tras aplomado y nivelado, a la placa de arranque. Las acciones horizontales entre estos elementos, aunque serían perfectamente soportables por rozamiento, se confían generalmente a soldadura. La fijación antes del hormigonado, y la resistencia al despegue y deslizamiento de la propia placa base se suelen confiar a redondos de engarce, como por ejemplo, en forma de omega, sin necesidad de cálculos explícitos, ya que el rozamiento puede ser más que suficiente.

Si el soporte es de hormigón armado, solicitado a compresión poco excéntrica, las tensiones del propio hormigón, se pueden transferir a la zapata espontáneamente, sin necesidad de artilugio alguno.[1] Los problemas de engarce típicos provienen pues de la transferencia de tensión de compresión o tracción de los redondos de armado del soporte, o de los vástagos a tracción de la placa de enlace cuando el fuste de acero acomete con ese tipo de tensión.

---

[1] Aun si el hormigón del soporte es de mayor resistencia que el de la zapata, debido al efecto de sobreresistencia local bajo su entronque, de hasta un factor de 3, en general sobra toda comprobación al respecto.

Para resolver ese problema conviene discutir previamente lo que significa el anclaje de redondos. Sea un redondo traccionado embutido en una masa de hormigón, al modo y manera de un anclaje en una zapata. Si hay equilibrio, es decir, si el hormigón pesa más que la tracción que se aplica al redondo, la masa, vista como una pieza de directriz horizontal, está sometida a un estado de flexión que tracciona la cara superior y comprime la inferior. La parte superior del anclaje está situado pues en una zona con tracción transversal en todas direcciones, y por tanto con adherencia muy reducida. En la parte final, por el contrario, la armadura se encuentra comprimida transversalmente en todas direcciones, con adherencia muy mejorada. En ninguna de ellas es aplicable directamente el valor de *longitud de anclaje*, que según su definición, refleja la longitud en la que, a tasa constante, una armadura puede perder por adherencia lateral, una fuerza de tracción igual a su capacidad. En este caso, la tracción casi permanece inmutable en el primer tramo, para desaparecer vertiginosamente en el último, la zona acotada con ℓ en la figura **40**. No obstante se suele considerar que, en este problema, lo que hay de menos en el primer tramo, sin casi adherencia, se compensa con lo que hay de más en el segundo, por lo que se admite que una armadura que penetre dentro del macizo una longitud igual a su longitud de anclaje teórica, aguantaría sin salirse una tracción igual a su capacidad.

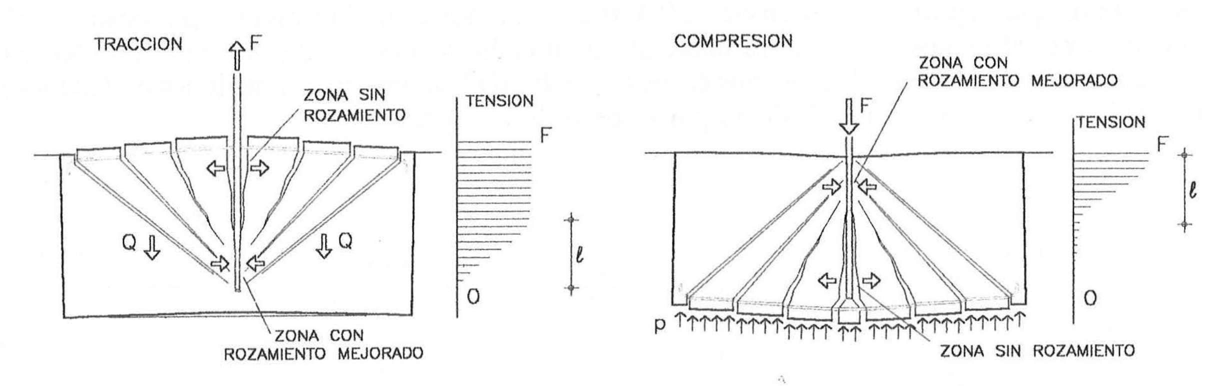


Figura 40. Anclaje a tracción y compresión

A compresión el problema se invierte. Ahora el macizo está sometido transversalmente a compresiones superiores y a tracciones inferiores. En la parte superior hay adherencia mejorada y en la inferior casi inexistente. La compresión se debe perder pues rápidamente en el primer tramo, zona acotada con ℓ, dejando el resto sin tensión. En concordancia con el caso anterior, a compresión bastaría la entrega de una longitud muchísimo menor que la denominada longitud de anclaje. La prolongación del redondo más allá de la tercera parte del canto del macizo, no aumenta sus posibilidades de anclaje por adherencia en el perímetro, y puede disminuir las de testa. A tracción es obvio que nada puede pasar por la punta del redondo, que se despega automáticamente del hormigón. Pero salvo que se adopten precauciones especiales, o se penetre demasiado, parte sustancial de la compresión puede pasar y pasa por la punta del redondo.[1]

Visto desde las solicitaciones del macizo, puesto que el equilibrio se hace con bielas en abanico, para un anclaje a tracción, lo mejor es que el redondo penetre lo más posible. Es así como se consigue el mayor brazo de palanca, véase figura **41**. A compresión es al revés. El mayor brazo de palanca se consigue con la menor penetración posible. Si la punta no basta por sí sola, es evidente que la mejor solución a compresión sería la disposición de una placa en la testa, como muestra la figura **42**. Por el contrario, a tracción, lo mejor sería llevar la armadura cuanto más abajo mejor, disponiendo una placa de ancla. En ambos casos el equilibrio se puede garantizar sin necesidad de adherencia a lo largo del redondo, aunque en la práctica se superpone este efecto.

Existe una diferencia adicional entre tracción y compresión. A tracción el equilibrio se produce contra el peso de la zapata, y si no hay bastante, aunque haya longitud de anclaje

[1] Debido a un efecto local de sobreresistencia, parece haber acuerdo en que contra un macizo de hormigón, un redondo de hasta $\phi 20$ puede descargar sin problemas toda su compresión por la punta.

suficiente, no se puede llegar a la capacidad mecánica de la armadura: mucho antes el conjunto se levanta.

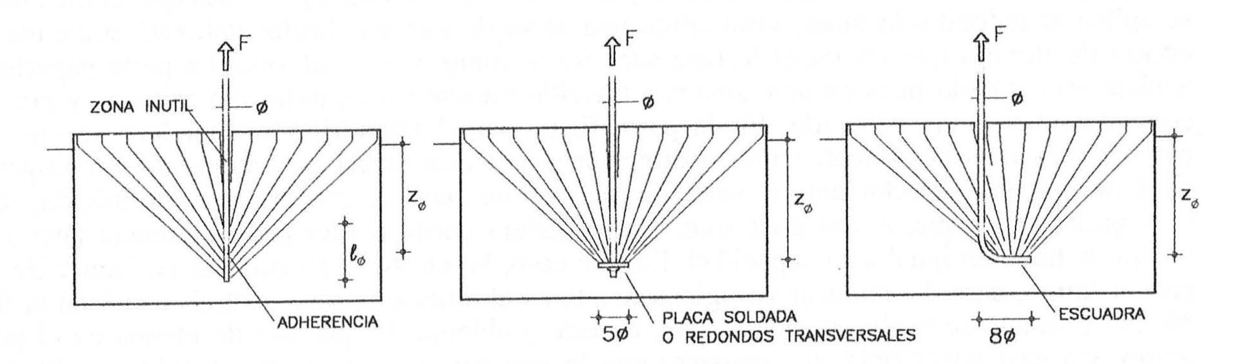


Figura 41. Soluciones a tracción

A compresión el equilibrio se hace contra la reacción del suelo. Para competir con un suelo tipo, que soporta del orden de 250 kN/m², una zapata de hormigón, que pesa 25 kN/m³ debería tener al menos 10 m de profundidad. Es inmediato pues que a tracción el problema tiene muchas más restricciones. En muchos casos la posibilidad de movilizar tracciones en los redondos de anclaje estará seriamente limitada por el peso de la zapata.[1]

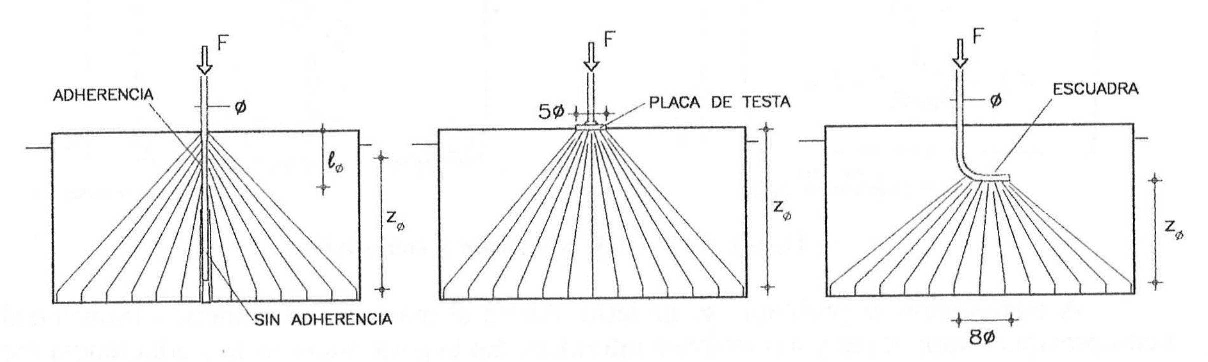


Figura 42. Soluciones a compresión

Sea ahora un soporte de hormigón, comprimido en todas sus fibras. Las armaduras aportan una parte de esa compresión. Según se ha visto, si no se dispone una placa de testa, para transferirla por rozamiento, basta una longitud francamente menor que la longitud de anclaje, y además no se puede evitar que buena parte, cuando no toda, se transfiera por punta. Si, cerca de ésta se dispone una chapa, una pareja de redondos soldados o una mera patilla, ese efecto puede hacerse cargo de casi toda la compresión.[2] En cualquier caso, debido a que las bielas de la zapata se equilibran contra esa zona, conviene disponer el artilugio lo más arriba posible. Para aplicar [3] a la compresión procedente de las armaduras, debe tomarse como brazo de palanca la distancia entre la armadura de la misma y el dispositivo de anclaje,[3] lo acotado con z_ϕ en las figuras.

[1] Un par de redondos de ϕ25 posee casi 10 cm², que, en acero B500, tienen una capacidad admisible de 280 kN. Para producir equilibrio con 1,5 de seguridad, deberían asociarse al menos a 16 m³ de hormigón. Es muy poco probable que exista zapata en esa relación.

[2] La regla, clásica, de que en redondos a compresión el remate en patilla es inconveniente, o que ésta no reduce la necesidad de anclaje, se refiere al problema de transferencia de tensión *entre* armaduras, que no es el caso.

[3] Sin embargo es frecuente encontrar propuestas de armado en las que la armadura del soporte se lleva hasta el fondo de la zapata, sin dejar brazo mecánico alguno, lo que significa que no es en ese punto donde se equilibra la compresión de la armadura. Y el tipo de remate, en escuadra hacia *afuera* patentiza que tampoco se suponen a tracción.

Con armadura comprimida, debido al patrón de bielas que conectan el fondo de la zapata con la patilla, la mejor disposición de ésta es hacia *afuera*.[1]

Si el soporte de hormigón tiene un borde traccionado, es porque está sometido a una compresión fuertemente excéntrica.[2] Como puede deducirse fácilmente, véase figura **20** y siguientes, las tracciones mantienen valor casi constante hasta el quiebro de la armadura. Llevando la armadura hasta el fondo de la zapata puede conseguirse que, a la salida en horizontal, hacia *adentro*, su tracción se haya reducido en la relación de brazos de palanca de soporte a zapata. La armadura sigue traccionada hasta el plomo del punto de aplicación de la compresión,[3] donde se anula. Como la reacción no es puntual, de ordinario debe superar ese punto, o solaparse con la parrilla que sí debe llegar hasta el borde de la zapata del lado de la carga.[4]

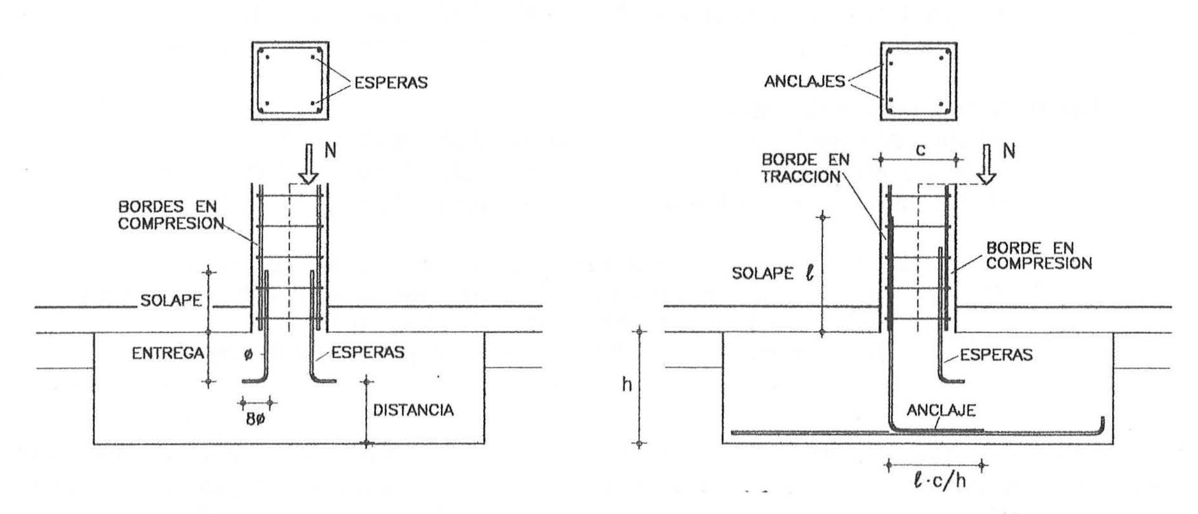


Figura 43. Anclaje de soportes de hormigón

Por motivos constructivos[5] la armadura del soporte se dispone en dos fases, primero la introducida en la zapata, que se deja asomando en espera para solaparla con la del fuste, que se construye después. Hay pues un doble problema de anclaje, el de las esperas en la zapata, ya visto, y el de las esperas en el fuste. Las armaduras del borde comprimido del fuste pueden descargar su compresión básicamente por punta. Raramente o sólo en pequeña fracción la pasarán a las de espera. Las armaduras de espera apenas tienen pues compresión que anclar, lo que relaja mucho las reglas con la que debe obtenerse la longitud introducida en la zapata, y aun las de solape de éstas con las del fuste.[6]

[1] Si se dispone hacia adentro, y muy cerca de la cara superior de la zapata, es posible que la flexión local inducida por el no enfrentamiento de acción y reacción tienda a escupir la armadura fuera del fuste. Esa es la explicación de porqué no es recomendable, en el empalme a compresión dentro de un fuste, el remate en patilla, ya que, por definición, ésta no puede sino orientarse hacia el interior de la pieza.

[2] No se está considerando el soporte con ambos bordes en tracción, que sería más bien un *tirante*, algo extremadamente improbable en estructuras habituales de edificios.

[3] En rigor hasta el punto resultante de la compresión y el peso de la zapata, que reduce la excentricidad según indica [11]

[4] La regla de que la armadura traccionada debe anclarse por *prolongación recta*, frecuentemente se enuncia sin explicitar que, en este caso, la prolongación es en horizontal, condicionando el *ancho* de la zapata; nunca el *canto*.

[5] No sólo es el de montar la armadura a tenor del proceso de hormigonado. Un soporte de hormigón, como uno de fábrica, resulta inestable hasta tanto se carga, por lo que debe apuntalarse hasta forjar la primera planta. Las armaduras de espera embebidas en la zapata, se destinan básicamente a arriostrar el fuste fresco.

[6] Sin embargo las reglas al uso, no descritas en la normativa, son las de disponer en espera armaduras en número y disposición iguales a las del soporte, solapando y entrando la longitud de anclaje teórica.

Por lo que respecta al borde traccionado, si lo hay,[1] no hay opción: deben disponerse esperas del mismo diámetro y número que las armaduras del fuste, solapándolas con ellas la longitud de anclaje teórica, penetrando en la zapata hasta el fondo, más la longitud necesaria por *anclaje en prolongación recta horizontal*[2] hacia adentro. La tabla **5** ofrece valores usuales.[3] Si la armadura traccionada está sobredimensionada, la longitud se puede reducir en el mismo factor, sin bajar de la indicada como mínima.

TABLA 5. LONGITUDES DE ANCLAJE DE SOPORTES EN ZAPATAS

Diámetro de la armadura	ϕ12	ϕ14	ϕ16	ϕ20	ϕ25	mm
Borde de soporte traccionado						
longitud básica, ℓ, en solape	0,30	0,40	0,50	0,70	1,10	m
longitud mínima *	0,15	0,15	0,15	0,25	0,35	m
Borde de soporte comprimido						
**solape recomendable ** **	0,30	0,35	0,40	0,50	0,70	m
longitud mínima de entrega ***	0,30	0,30	0,30	0,40	0,50	m
distancia de patilla a fondo	0,10	0,15	0,20	0,25	0,40	m

* en solape si hay armadura sobreabundante o en anclaje con parrilla
** suponiendo que las armaduras del soporte descansan básicamente por punta
conviene que no sea inferior al lado mínimo del soporte
*** suponiendo que descarga fundamentalmente por una patilla dispuesta hacia afuera

Si el borde traccionado es el de un soporte de acero, en algunos casos, el dimensionado de la chapa base puede convertir su borde de ese lado en comprimido, de manera que la transferencia de tracciones queda como un problema interno del fuste contra su chapa. En los casos de más excentricidad subsistirán tracciones entre chapa y zapata, debiendo acudirse a soluciones como las representadas en la figura **44**, no siendo aconsejable la solución de dos chapas, entre las que es mucho más difícil resolver el enlace a tracción por soldadura en su borde. La solución del enlace a tracción del soporte a zapata suele estar plagado de condiciones difícilmente conciliables.

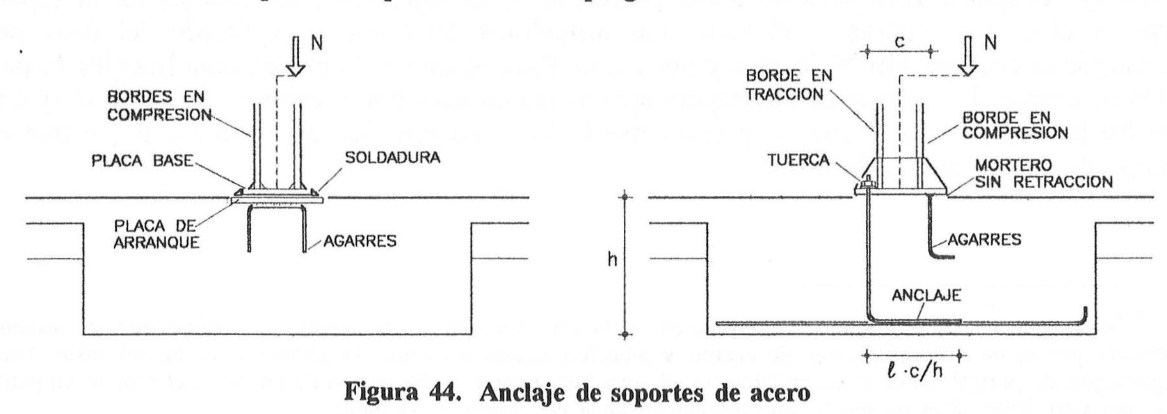


Figura 44. Anclaje de soportes de acero

[1] Es frecuente que el procedimiento seguido sea considerar soportes empotrados a zapatas, luego armarlos para las solicitaciones resultantes del análisis, y por último, disponer armaduras de espera dotándolas de longitud de anclaje en vertical dentro de la zapata, y canto para ello. Falta comprobar el equilibrio. Sobre todo con ϕ20 o ϕ25 conviene comprobar que la zapata pesa lo suficiente para dar cuenta de la tracción obtenida; en caso contrario, la estructura debe reanalizarse desde otros supuestos, tal como soporte articulado en un punto apropiado.

[2] Es frecuente encontrar la regla, irreflexiva, de que la longitud de anclaje, en prolongación recta, debe ser en vertical. El tramo vertical, por equilibrio, no tiene apenas reducción de tensión, algo que sólo es posible en horizontal. El canto de la zapata no depende nunca del diámetro de la armadura anclada; por este motivo no necesita ser nunca superior al lado del soporte.

[3] Corresponden a hormigón HM20 y acero B500 según la norma española. Inexplicablemente ésta omite los valores para anclar un soporte de hormigón armado en una zapata de hormigón en masa de HM20; debido a que son los mismos, se han tomado de la versión anterior. Con HA25 o B400, los valores pueden reducirse algo.

CUADERNO

109.01

CATÁLOGO Y PEDIDOS EN
http://www.aq.upm.es/of/jherrera
jherrera@aq.upm.es

